UNIVERSITATEA „AL.I.CUZA" IAȘI
FACULTATEA DE FIZICĂ

V. TUTOVAN

ELECTRICITATE ȘI MAGNETISM

Partea a II-a

UZ INTERN
•1976•

Scanned with OKEN Scanner

UNIVERSITATEA "AL.I.CUZA" IASI
Facultatea de fizică

V. TUTOVAN

ELECTRICITATE SI MAGNETISM

Partea a II-a

Electrocinetica curentului continuu

I A S I
- 1 9 7 6 -

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 5. GENERALITATI ASUPRA CURENTULUI ELECTRIC

5.1. Notiunea de curent electric.

Sarcinile electrice, - sau particulele purtătoare de sarcini electrice - , în mişcare dirijată, constituie un curent electric.

Din electrostatică se ştie că dacă se unesc cu un fir conductor, doi conductori A şi B aflaţi la potenţiale diferite, $V_A > V_B$, după un timp scurt Δt , conductorul nou constituit, - A, fir de legătură, B - , se va găsi la potenţialul V, de valoare cuprinsă între V_A şi V_B . In timpul Δt , sarcini electrice de pe conductorul A au trecut pe conductorul B , luînd astfel naştere un flux de sarcini electrice, adică un curent electric (fig. 5-1). Intrucît acest curent durează un scurt interval de timp şi nu este constant, se numeşte curent tranzitoriu (sau în regim tranzitoriu).

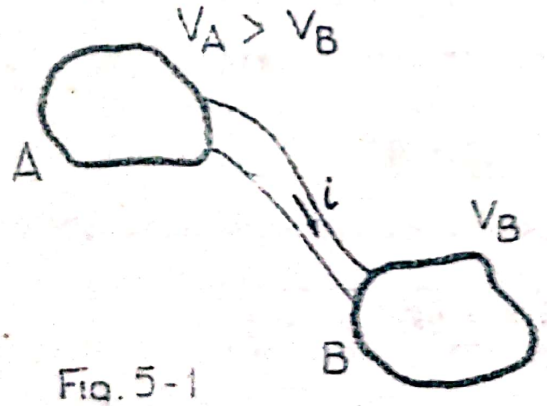


Fig. 5-1

Curentul electric a putut să existe datorită faptului că cei doi conductori aveau potenţiale electrice diferite; cînd potenţialele acestea au devenit egale, curentul a încetat. De aici se poate conclude că, pentru a avea un curent electric permanent (în regim permanent), este necesar să se menţină o diferenţă de potenţial permanentă între doi conductori care să facă parte dintr-un circuit închis

(fig. 5-2). Dispozitivul, construit pe diverse principii, care menţine diferenţa de potenţial $V_A - V_B$ un timp îndelungat (permanent) se numeşte <u>generator electric</u> (G).

Generatorii electrici, - despre existenţa cărora ştim şi de care ne vom ocupa mai departe - , nu creează sarcini electrice ci numai fac ca particulele purtătoare de sarcini electrice să circule într-un circuit, cum face, - în mod asemănător - , o pompă să circule un lichid printr-o conductă închisă.

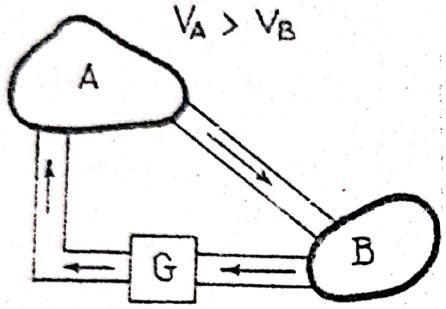


Fig. 5-2

Mărimile care caracterizează curentul electric sînt vectorul densitate de curent, $\vec{i}$ şi <u>intensitatea curentului, I</u> .

5.2. <u>Vectorul densitate de curent</u>.

5.2.1. <u>Definiţii</u>. Particulele în deplasare care constituie curentul electric, pot avea într-un punct oarecare M , viteza medie $\vec{v}$. Un element de suprafaţă dS din jurul lui M , a cărui normală $\vec{n}$ face unghiul θ cu vectorul $\vec{v}$, este traversat în permanenţă de purtătorii de sarcină în deplasare. Dacă asimilăm fluxul de particule electrizate cu un fluid de densitate volumică de sarcină ρ , în punctul M , sarcina electrică dq care traversează elementul de suprafaţă dS în timpul dt va fi dată de produsul:

$$dq = \rho \, d\mathcal{V} \qquad (5\text{-}1)$$

unde $d\mathcal{V}$ este volumul în care sînt conţinute particulele care trec prin dS în timpul dt , fig. (5-3). Elementul de volum $d\mathcal{V}$ este egal cu volumul unui cilindru ale cărui generatoare

sînt paralele cu vectorul $\vec{v}$, sprijinindu-se pe conturul elementului de suprafaţă dS şi au lungimea egală cu v.dt :

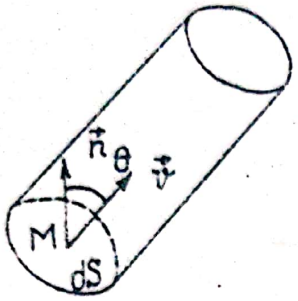


Fig. 5-3

$$d\mathcal{C} = v \cos \Theta \, dS \, dt \qquad (5\text{-}2)$$

Din relaţiile de mai sus rezultă expresia lui dq :

$$dq = \rho v \cos \Theta \, dS \, dt = \rho \vec{v}.\vec{n} \, dS \, dt \qquad (5\text{-}3)$$

Relaţia (5-3) sugerează că într-un punct oarecare M , - deci local - , curentul electric poate fi caracterizat printr-un vector,

$$\vec{i} = \rho \vec{v} \quad , \qquad (5\text{-}4)$$

numit <u>vectorul densitate curent</u>. Acesta este proporţional şi paralel cu viteza medie $\vec{v}$ a particulelor în punctul M ; valoarea sa, i , se numeşte <u>densitate de curent</u>.

In cazul considerat mai sus, s-a presupus că sarcinile sînt pozitive şi se deplasează într-un sens anumit; acelaşi vector $\vec{i}$ corespunde şi unui curent constituit din sarcini negative care se deplasează în sens opus. Dacă un curent electric este datorat mai multor tipuri de sarcini, atunci expresia (5-4) devine:

$$\vec{i} = \sum \rho_i \vec{v}_i \qquad (5\text{-}5)$$

unde ρ_i şi $\vec{v}_i$ reprezintă densitatea volumică de sarcină şi viteza medie a purtătorilor de sarcină de tipul i într-un punct oarecare, M .

Pentru studiul curentului electric se folosesc şi no-

ţiunile de <u>linie de curent</u>, aceasta fiind tangentă în fiecare punct la vectorul $\vec{i}$ şi de <u>tub curent</u>, acesta fiind constituit din linii de curent care se sprijină pe un contur închis.

Cînd vectorul de densitate de curent depinde de variabilele spaţiale x,y,z ,

$$\vec{i} = \vec{i}(x,y,z) \qquad (5-6)$$

curentul electric pe care îl caracterizează se numeşte curent <u>continuu</u>.

In acest caz, întrucît şi alte mărimi caracteristice ale sistemului ca densitatea superficială σ , sau densitatea cubică ρ , nu depind de asemenea de timp, se spune că este vorba de un <u>regim staţionar</u> (cum este şi în electrostatică). In cazul cînd acest vector mai depinde şi de timp,

$$\vec{i} = \vec{i}(x,y,z,t) \qquad (5-7)$$

avem de-a face cu un <u>regim variabil</u>.

5.2.2. <u>Proprietăţile vectorului densitate de curent</u>.

a. Să considerăm un tub de curent limitat de secţiunile drepte dS_1 şi dS_2 , în cazul unui curent continuu (fig. 5-4). Deoarece regimul este staţionar şi cum prin suprafaţa laterală a tubului de curent nu intră şi nici nu ies sarcini electrice, sarcina electrică dq_2 care iese din tub în timpul dt este egală cu dq_1 care intră în tub, în acelaşi interval de timp:

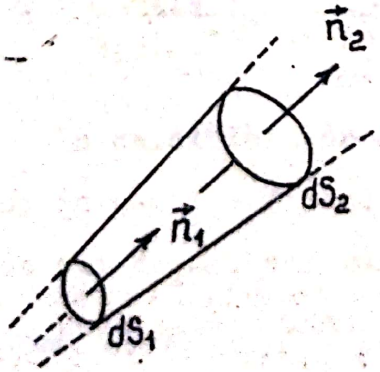


Fig. 5-4

$$dq_1 = dq_2 \qquad (5-8)$$

Făcînd uz de relaţiile (5-3), (5-4), egalitatea de mai sus se poate scrie:

$$\vec{i}_1 \cdot \vec{n}_1 \, dS_1 \, dt = \vec{i}_2 \cdot \vec{n}_2 \, dS_2 \, dt$$

sau,

$$\vec{i}_1 \cdot \vec{n}_1 \, dS_1 = \vec{i}_2 \cdot \vec{n}_2 \, dS_2 \qquad (5\text{-}9)$$

Relaţia (5-9) spune că <u>fluxul vectorului densitate de curent este conservativ</u>; această proprietate se poate exprima şi scriind:

$$\operatorname{div} \vec{i} = 0 \qquad (5\text{-}10)$$

b. In afară de faptul că vectorul $\vec{i}$ este de flux conservativ, în cazul unui conductor vectorul $\vec{i}$ are proprietatea de a fi perpendicular la normala în fiecare punct al suprafeţei, în apropierea acesteia, ceea ce se exprimă matematic prin relaţia:

$$\vec{i} \cdot \vec{n} = 0 \qquad (5\text{-}11)$$

Considerînd că regimul este staţionar, liniile de curent nu pot fi decît paralele cu suprafaţa conductorului (fig. 5-5 a), aşa cum exprimă relaţia de mai sus. Dacă liniile de curent ar ajunge perpendicular sau oblic la suprafaţa S , pe suprafaţă s-ar acumula sarcini în timp, ceea ce nu poate avea loc,

a b

Fig. 5-5

întrucît regimul este staţionar.

5.3. Intensitatea de curent. Referindu-ne la fig. (5-6), pentru a caracteriza debitul sarcinilor electrice prin elementul de suprafaţă dS, se introduce mărimea numită intensitatea curentului electric, care reprezintă raportul dintre sarcina electrică dq care a trecut prin elementul de suprafaţă dS în timpul dt şi intervalul de timp dt :

$$dI = \frac{dq}{dt} \qquad (5\text{-}12)$$

Dacă ne referim la un fir conductor, dQ fiind sarcina electrică totală care străbate suprafaţa unei secţiuni oarecare a firului, atunci se poate scrie:

$$I = \frac{dQ}{dt} \qquad (5\text{-}13)$$

unde I este intensitatea curentului electric care parcurge conductorul.

Ţinînd seama de relaţiile (5-3), (5-4) şi (5-12), expresia curentului electric care parcurge conductorul

$$I = \int_S dI = \int_S \vec{i}.\vec{n}\, dS = \int_S \vec{i}.\vec{dS} \quad , \qquad (5\text{-}14)$$

integrala fiind extinsă la suprafaţa întregii secţiuni a firului lui (fig. 5-6). Deci intensitatea curentului, I, reprezintă fluxul total al vectorului $\vec{i}$ printr-o secţiune oarecare de suprafaţă S a firului.

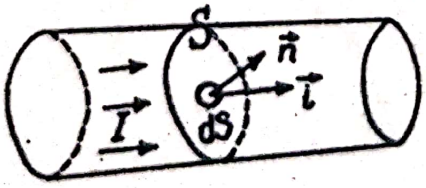


Fig. 5-6

Intensitatea curentului nu depinde de suprafaţa secţiunii alese, întrucît, - aşa cum s-a precizat - , fluxul vectorului densitate de curent $\vec{i}$ este

conservativ.

Din relaţia (5-14) rezultă că i se măsoară în amperi pe metru pătrat (A/m^2) şi că are dimensiunile: $[i] = [I\,L^{-2}]$.

Intensitatea curentului electric poate lua, după caz, valori cuprinse într-o gamă foarte largă: de la 1p A = 10^{-12} A pînă la 10^5 A . Curenţii de diverse intensităţi se pot datora diverşilor purtători de sarcină, care pot exista în anumite condiţii; în vid de exemplu, purtătorii de sarcină pot fi electronii, protonii, mezonii, ionii etc., iar în corpurile conductoare solide sau lichide purtătorii de sarcină sînt electronii, golurile şi ionii. In aceste corpuri, - metale, semiconductori, electroliţi - , curenţii pot să aibă intensităţi mult mai mari decît în vid sau în gaze la presiune redusă. Tipurile de conductibilitate cele mai întîlnite sînt conductibilitatea electronică şi conductibilitatea ionică.

Scanned with OKEN Scanner

Cap. 6. LEGEA LUI OHM. ENERGIA ELECTRICA IN CURENT CONTINUU

6.1. Legea lui Ohm (sub formă) locală.

Această lege, descoperită de G. Ohm în 1827, se exprimă sub formă locală sau integrală şi se referă la o porţiune de circuit sau la un circuit (liniar) închis, depinzînd de componenţa acestora.

6.1.1. Regim permanent de curent. Ne vom referi, pentru început, la cazul particular cînd, aplicînd la capetele unui fir conductor o diferenţă de potenţial, prin acesta circulă un curent electric (fig. 6-1).

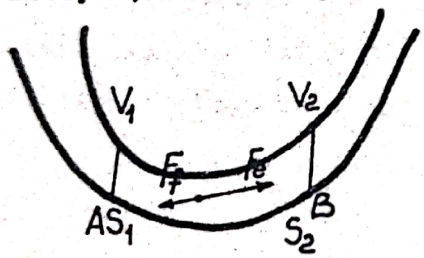


Fig. 6-1

Dacă diferenţa de potenţial $V_1 - V_2$ se menţine constantă datorită unui generator care există în restul circuitului electric, se stabileşte un regim permanent de curent, Pentru a explica existenţa acestui curent, admitem că asupra purtătorilor de sarcină din porţiunea de conductor AB se exercită două forţe. Una din aceste forţe, care face ca sarcinile electrice să se deplaseze şi să constituie curentul electric, provine din faptul că, datorită diferenţei de potenţial aplicate la capetele conductorului, în interiorul acestuia acţionează un cîmp de natură electrostatică E_s ; forţa de natură electrică, care acţionează asupra fiecărui purtător avînd sarcina q , se va exprima ca în electostatică:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}_S \qquad (6\text{-}1)$$

Forţa $\vec{F}_e$ face ca particulele încărcate să se deplaseze cu o viteză $\vec{v}$ crescîndă în timp. Dar datorită ciocnirii particulelor electrizate libere cu particulele care constituie mediul conductor, - în cazul unui conductor metalic, ionii reţelei cristaline - , se poate considera că, în medie, asupra acestora acţionează o forţă de frecare $\vec{F}_f$. Introducerea acestei forţe nu reprezintă decît un mijloc de a ţine seama de interacţiunile dintre purtătorii de sarcină liberi şi ionii reţelei. Intrucît viteza de deplasare a purtătorilor de sarcină este mai mică, - după cum vom vedea - , se poate presupune că forţa de frecare este proporţională cu viteza $\vec{v}$ (nu cu pătratul acesteia) şi cum $\vec{F}_f$ se opune mişcării particulelor, expresia acesteia este:

$$\vec{F}_f = -a\vec{v} \qquad (6\text{-}2)$$

In urma faptului că $\vec{F}_e$ face ca mişcarea particulelor să fie accelerată, viteza aceasta creşte în timp; totodată însă creşte şi $\vec{F}_f$. După un anumit interval de timp, - care este foarte scurt, după cum vom arăta - (6.1.2) cele două forţe sînt egale şi de sens contrar; $q\vec{E} - a\vec{v} = 0$ în consecinţă, particulele se pot deplasa cu o viteză limită $\vec{v}$ care este constantă:

$$\vec{v}_e = \frac{q}{a}\vec{E}_S \qquad (6\text{-}3)$$

Datorită faptului că valoarea vitezei v_e este mică, se poate admite că atît $\vec{E}_s$ cît şi densitatea cubică ρ a sarcinilor mobile au aceleaşi valori ca în lipsa mişcării particulelor. Inmulţind ambii membri ai ecuaţiei de mai sus cu ρ , se obţine:

$$\rho \vec{v}_\ell = \frac{\rho q}{a} \vec{E}_s \qquad (6-4)$$

Intrucît $\rho \vec{v}_\ell = \vec{i}$, dacă se notează $\sigma = \frac{\rho q}{a}$, relaţia (6-4) se va scrie:

$$\vec{i} = \sigma \vec{E}_s \qquad (6-5)$$

Această relaţie exprimă legea lui Ohm (sub formă) locală: în fiecare punct al conductorului, vectorul densitate de curent este proporţional şi coliniar cu cîmpul electrostatic.

Constanta de prpporţionalitate σ , din legea lui Ohm locală, se numeşte <u>conductibilitate specifică</u> sau <u>conductibilitate electrică</u>. Inversul conductibilităţii, $1/\sigma$, se numeşte <u>rezistivitate</u>.

6.1.2. <u>Dinamica mişcării purtătorilor de sarcină</u>. Vom considera cazul particular al conductorilor metalici, în care purtătorii de sarcină sînt electronii şi forţa de frecare provine din ciocnirilie acestora cu nodurile reţelei cristaline. La un moment dat, asupra electronului de masă m şi sarcină e acţionează forţele $\vec{F}_e$ şi $\vec{F}_f$; ţinînd seama de legea fundamentală a dinamicii, ecuaţia diferenţială a mişcării electronului în cîmpul electric uniform $\vec{E}_s$ se scrie:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e \vec{E}_s - a\vec{v} \qquad (6-6)$$

Considerînd că $\vec{E}_s$ se aplică la momentul $t = 0$, cînd un electron are viteza nulă, în momentele următoare viteza acestuia va avea aceeaşi direcţie şi sens ca şi cîmpul $\vec{E}_s$; în consecinţă, ecuaţia (6-6) se poate transcrie astfel:

$$m \frac{dv}{dt} + av = eE_s \qquad (6-7)$$

Ținînd cont de condiția inițială, din ecuația (6-8), rezultă următoarea expresie a vitezei:

$$v = \frac{eE_s}{a}\left(1 - e^{-\frac{a}{m}t}\right) \qquad (6\text{-}9)$$

După ce electronul începe să se deplaseze are loc un regim tranzitoriu; acesta nu durează mult întrucît termenul al doilea din membrul doi al relației de mai sus scade exponențial cu o constantă de timp $\tau = \frac{m}{a}$.

După un timp t mare față de <u>timpul de relaxare</u> τ, ($\tau \simeq 10^{-14}$ s) viteza v atinge valoarea sa limită:

$$\vec{v}_l = \frac{e}{a}\vec{E}_s \quad , \text{ sau } \quad \vec{v}_l = \frac{e\vec{E}_s}{m}\tau \qquad (6\text{-}10)$$

care este o valoare medie, putînd fi luată în considerare la descrierea fenomenelor macroscopice, cum s-a procedat în paragraful precedent.

Relația (6-10) scrisă sub forma $\vec{v}_l = \mu\vec{E}_s$ conduce la definiția <u>mobilității purtătorului de sarcină</u>; - în cazul considerat al electronului - :

$$\mu = \frac{v_l}{E_s} = \frac{e}{a} = \frac{e\tau}{m} \qquad (6\text{-}11)$$

Mobilitatea purtătorilor de sarcină reprezintă deci viteza pe care o capătă aceștia într-un cîmp egal cu unitatea.

Din cele de mai sus rezultă că legea lui Ohm locală se scrie, în cazul considerat, sub forma:

$$\vec{i} = ne\vec{v}_l = \frac{ne^2}{a}\vec{E}_s = \frac{ne^2\tau}{m}\vec{E}_s = \sigma\vec{E}_s \qquad (6\text{-}12)$$

<u>Observație</u>. In scrierea curentă, nu este necesar să se mai utilizeze indicii l și s, cum se va proceda în continuare.

Din relaţia (6-12), reiese că în cazul metalelor

$$\sigma = \frac{ne^2}{a} = \frac{ne^2\tau}{m} = ne\mu \qquad (6\text{-}13)$$

Expresia (6-13), care spune că conductivitatea unui conductor metalic este proporţională cu densitatea electronilor şi cu mobilitatea acestora, se poate extinde şi la cazul cînd conducţia se datorează unor purtători de sarcină de semne diferite:

$$\sigma = n_+ q_+ \mu_+ + n_- q_- \mu_- \qquad (6\text{-}14)$$

unde q_+ , q_- , n_+ , n_- , μ_+ şi μ_- reprezintă sarcinile, densităţile şi mobilităţile celor două tipuri de purtători.

Cu datele din paragraful precedent (6.1.2) şi cu cele referitoare la electron, se găseşte, dacă se ia pentru conductivitatea cuprului $\sigma = 5{,}8.10^7 \Omega^{-1}m^{-1}$ (din măsurători), că:

$$a = \frac{20.10^{-10}}{5{,}8.10^7} \simeq 3{,}5.10^{-17} \text{ , } \mu = \frac{1{,}6.10^{-19}}{3{,}5.10^{-17}} \simeq 5.10^{-3}\ \frac{m^2}{Vs}$$

şi

$$\tau = \frac{9.10^{-31}}{3{,}5.10^{-17}} \simeq 2{,}5.10^{-14}\ s \ .$$

In cazul tuturor metalelor μ este de acelaşi ordin de mărime; în cazul semiconductorilor însă, - cum vom vedea - , μ este de mii de ori mai mare.

Rezultatele numerice de mai sus permit să se facă unele precizări. Deoarece durata regimului tranzitoriu este mult mai mică decît orice durată măsurabilă experimental, rezultă că sarcinile care se transportă în acest interval de timp sînt în cantitate cu totul neglijabilă faţă de sarcinile libere con-

ţinute în conductor chiar dacă densitatea curentului este de ordinul a 10^6 A/m^2 , (valoare care rareori este depăşită în practică), şi că fiecare purtător de sarcină (electroni, ioni) capătă aproape instantaneu viteza limită.

Faptul că densitatea de sarcină nu variază în timp, vine sprijinul presupunerii făcute anterior, că E_s este constant în timp. Faptul că v este de ordinul a 10^{-3} m/s, justifică exprimarea forţei de frecare F_f ca fiind proporţională cu viteza şi nu cu viteza la pătrat.

Intrucît efectul inerţiei purtătorilor de sarcină, ca şi regimul tranzitoriu, nu poate fi sesizat experimental, rezultă că legea lui Ohm locală de trecere a curentului prin conductori este valabilă (pentru un moment dat) atît în cazul curentului continuu cît şi al curentului variabil în timp, curentul variabil putînd fi considerat ca o gamă continuă de regimuri permanente. Legea lui Ohm se verifică foarte bine experimental prin ansamblul consecinţelor care decurg din aceasta.

6.2. Legea lui Ohm (sub formă) integrală

Ne referim iarăşi la un conductor omogen, prin care trece un curent de intensitate I, datorită faptului că feţele de la extremităţile sale de suprafaţă S_1 şi S_2 , se află la potenţiale diferite: $V_1 > V_2$, (fig.6-2). Intensitatea curentului, I, depinde atît de diferenţa de potenţial $V_1 - V_2$, cît şi de natura şi forma geometrică a porţiunii

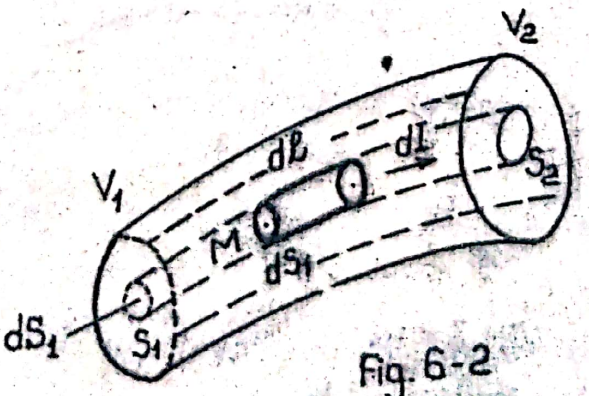


Fig. 6-2

de conductor. Pentru a determina această dependenţă, se începe prin a considera că S_1 şi S_2 sînt echipotenţiale şi că conductorul conţine tuburi de curent elementare. Apoi se delimitează dintr-un asemenea tub, care decupează pe suprafaţa S_1 elementul de suprafaţă dS_1 şi care este parcurs de curentul dI, o porţiune de lungime $d\ell$, avînd suprafaţa secţiunii drepte printr-un punct M egală cu dS.

Dacă se aplică legea lui Ohm locală în punctul M, scriind că:

$$dI = \sigma E_s dS = i\, dS \qquad (6\text{-}15)$$

circulaţia cîmpului electrostatic E de-a lungul unei linii de curent, - care este totodată şi linie de cîmp -, cu extremităţile pe cele două suprafeţe, se poate scrie:

$$V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E}_s d\vec{\ell} = \int_1^2 \frac{\vec{i}}{\sigma} d\vec{\ell} = \int_1^2 \frac{dI}{\sigma\, dS}\, d\ell \qquad (6\text{-}16)$$

Intrucît într-un tub de curent intensitatea curentului se conservă, dI poate fi scos de sub semnul integrală şi (6-16) devine:

$$V_1 - V_2 = dI \int_1^2 \frac{d\ell}{\sigma\, dS}$$

Relaţia de mai sus, pusă sub forma

$$r = \frac{V_1 - V_2}{dI} = \int_1^2 \frac{d\ell}{\sigma\, dS}\,, \qquad (6\text{-}17)$$

defineşte rezistenţa tubului de curent, care este egală cu suma rezistenţelor elementelor de tub componente aranjate în serie.

Modul de scriere a relaţiilor de mai sus face ca integrala să fie infinit de mare; de aceea, aceste relaţii se scriu în felul următor:

$$V_1 - V_2 = \frac{dI}{dS_1} \int_1^2 \frac{d\ell}{\sigma \frac{dS}{dS_1}} \quad \text{şi} \quad r = \frac{(V_1 - V_2)dS_1}{dI} = \int_1^2 \frac{d\ell}{\sigma \frac{dS}{dS_1}} \qquad (6\text{-}18)$$

Curentul total prin conductor va fi egal cu suma curenţilor care străbat întregul ansamblu de tuburi de curent şi este dat de integrala extinsă la suprafaţa S_1 a lui dI :

$$I = \int_{S_1} dI = \int_{S_1} \frac{(V_1 - V_2)dS_1}{\int_1^2 \sigma \frac{d\ell}{dS}} \qquad (6\text{-}19)$$

Relaţia de mai sus se poate scrie sub formă simplificată:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad , \qquad (6\text{-}20)$$

unde R ,raportul dintre diferenţa de potenţial aplicată la capetele conductorului şi intensitatea curentului care îl parcurge, $R = \frac{V_1 - V_2}{I}$, este, prin definiţie, <u>rezistenţa acelui conductor</u>. Din relaţiile (6-19), (6-20) reiese că:

$$\frac{1}{R} = \int_{S_1} \frac{dS_1}{\int_1^2 \sigma \frac{d\ell}{dS}} \qquad (6\text{-}21)$$

Relaţia (6-20) reprezintă legea lui Ohm sub formă integrală. referitoare la o porţiune dintr-un circuit electric

constituit dintr-un conductor omogen (σ constant).

La aceeaşi lege a lui Ohm, referitoare la o porţiune de circuit omogen se poate ajunge, mai simplu considerînd că conductorul este omogen şi de secţiune uniformă. Circulaţia cîmpului electric între cele două suprafeţe extreme echipotenţiale ale conductorului, în acest caz, se scrie:

$$V = V_1 - V_2 = E\ell \quad , \qquad (6\text{-}22)$$

dacă ℓ este lungimea conductorului. Legea lui Ohm locală şi definiţia intensităţii curentului permit să exprimăm densitatea de curent sub forma:

$$\frac{I}{S} = \sigma E \qquad (6\text{-}23)$$

Din relaţiile (6-22), (6-23), rezultă:

$$I = \sigma \frac{V}{\ell} S = \frac{V}{\frac{1}{\sigma}\frac{\ell}{S}} = \frac{V}{R} \quad , \qquad (6\text{-}24)$$

unde

$$R = \frac{1}{\sigma}\frac{\ell}{S} = \rho\frac{\ell}{S} \qquad (6\text{-}25)$$

este, prin definiţie, rezistenţa electrică a conductorului omogen şi de secţiune uniformă.

Rezistenţa electrică a unui conductor poate fi cunoscută deci cu ajutorul relaţiilor (6-17),(6-21); procedeul acesta este însă greoi şi poate fi aplicat numai în cazurile, relativ rare, cînd se cunoaşte repartiţia liniilor de curent în interiorul conductorului. În cazul unui conductor cilindric omogen, rezistenţa poate fi calculată cu ajutorul relaţiei (6-25).

De cele mai dese ori însă, rezistenţa unui conductor, omogen sau neomogen şi de orice formă, se determină prin măsură-

tori, aşa cum se va arăta mai departe.

Deci legea lui Ohm pentru o porţiune de conductor omogen (6-20), (6-24) spune că intensitatea curentului care străbate o porţiune de circuit, constituită dintr-un conductor omogen, este proporţională cu diferenţa de potenţial aplicată la capetele acelei porţiuni de circuit. Dacă temperatura se menţine constantă ($\Delta T < 0,01^{\circ}C$), legea lui Ohm sub această formă se verifică cu o precizie pînă la $1/10^5$.

Diferenţa de potenţial, sau tensiunea aplicată, compensează căderea de tensiune,

$$RI$$

care are loc în rezistenţă. Schemele din fig. (6-3) sugerează

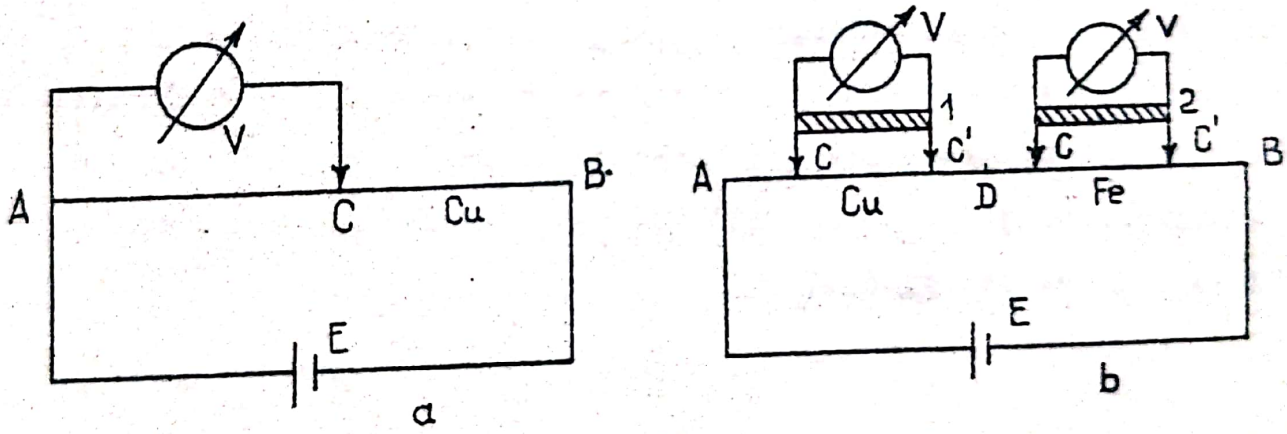


Fig. 6-3

o serie de experienţe care pun în evidenţă căderea de tensiune ohmică şi că aceasta depinde de I şi de R, adică şi de natura şi forma geometrică a conductorului.

Conductorul filiform ACB este de cupru şi are acelaşi diametru ca şi conductorul ADB, care este constituit din cupru şi fier. Deplasînd cursorul C de la A spre B, căderea

de tensiune creşte, după cum indică voltmetrul V (fig.6-3 a).

Menţinînd cei doi cursori C şi C' la o distanţă constantă unul de altul, - prin intermediul unei bare izolate - , dacă aceştia lunecă pe porţiunea de conductor AD indicaţia voltmetrului este mai mică decît atunci cînd lunecă pe porţiunea DB a conductorului. Căderea de tensiune între două puncte echidistante este mai mare în cazul al doilea, pentru că firul de fier are o rezistivitate mai mare decît firul de cupru (fig. 6-3 b).

La transportul energiei electrice este obligatoriu să se ţină seama de căderea de tensiune pe fire, întrucît la capetele terminus ale conducţiei tensiunea este mai mică decît aceea aplicată. Ulterior (6.5.4.2) se va arăta în ce condiţii este mai avantajos să se transporte energia electrică la distanţă. Legea lui Ohm permite să se introducă în "electricitate" o nouă mărime, <u>rezistenta electrică</u>, aceasta depinzînd numai de natura conductorului şi de parametrii lui geometrici. Inversul rezistenţei se numeşte <u>conductanţă</u>:

$$C = \frac{1}{R} \qquad (6\text{-}26)$$

Dimensiunile rezistenţei în SI sînt: $[R] = [L^2MT^{-2}I^{-2}]$ iar unitatea de măsură este ohm-ul (Ω) ; <u>un ohm</u> este o rezistenţă electrică dintre două puncte ale unui conductor, cînd aplicarea între ele a unei tensiuni constante de 1 volt la acele puncte produce un curent de un amper, dacă acel conductor nu este sediul altor tensiuni electromotoare. $1\Omega = 10^9$ u.e.m. CGS = $1/9.10^{11}$ u.e.s. CGS.

Un ohm are o rezistenţă practic egală cu rezistenţa unei coloane de mercur, lungă de 106,32 cm şi cu masa de 14,4521 g

(ceea ce corespunde la o secţiune a coloanei de 1 mm^2).

Unitatea de conductanţă se numeşte ohm reciproc siemens (S) sau mho (Ω^{-1}) şi este conductanţa unui circuit a cărui rezistenţă este de un ohm. O unitate CGS e.m. de conductanţă = 10^9 S, iar o unitate CGS e.s de conductanţă = $\frac{1}{c^2} 10^9$S.

Formula (6-25) permite să se definească unitatea de rezistivitate (ρ), (sau de rezistenţă specifică), care se numeşte în SI. ohmmetru (Ω m) şi care este egală cu rezistivitatea materialului izotrop din care un conductor cu lungimea de 1 m şi aria secţiunii drepte de 1 mm^2 are rezistenţa de 1Ω;

In practică se foloseşte adesea o altă unitate, numită $\frac{\Omega\, mm^2}{m}$ şi este rezistivitatea materialului izotrop din care un conductor cu lungimea de 1 m şi aria secţiunii drepte de 1 mm^2 are rezistenţa de 1Ω; lungimea poate fi aleasă de 1 cm şi aria secţiunii de 1 cm^2, atunci unitatea se numeşte Ω cm.

$$1\ \frac{\Omega\, mm^2}{m} = 10^{-6}\Omega\ m\ ; \qquad 1\ \frac{\Omega\, cm^2}{cm} = 1\Omega\ cm = 10^{-2}\Omega\ m\ .$$

Unitatea de conductivitate electrică, sau conductibilitate specifică σ, se numeşte siemens pe metru (S/m) şi este conductivitatea materialului izotrop a cărui rezistivitate este de 1Ω m; deseori această unitate se notează cu $\Omega^{-1}m^{-1}$.

6.3. Variaţia rezistivităţii cu diversi factori

6.3.1. Rezistivitatea depinde de natura corpului. Din acest punct de vedere, toate corpurile pot fi clasificate, convenţional, în trei grupe mari: conductori, corpuri cu conductivitate mediocră, şi izolanţi (fig. 6-4).

Un corp se poate considera ca fiind izolant, dacă rezistivitatea depăşeşte $10^6 \Omega$ .m , putînd atinge valoarea de $10^{18} \Omega$ m. Uneori, datorită conductivităţii superficiale a eşantioanelor construite din izolanţi, care se datorează faptului că suprafaţa acestora nu este curată, se poate confunda rezistivitatea aparentă cu aceea de volum (ρ) . Un corp este conductor, cînd are o rezistivitate care este mai mică de $10^{-4} \Omega$ m, - în special de ordinul lui $10^{-7} \Omega$ m, cum o au conductorii metalici. Categoria de corpuri cu rezistivitatea cuprinsă între aproximativ $(10^{-4} - 10^{6}) \Omega$ m , au o conductivitate mediocră; din această categorie face parte şi grupa bine distinctă a <u>corpurilor</u> numite <u>semiconductoare</u>. Practic, nu există corp conductor sau izolant perfect, însă ţinînd seama de marea diferenţă care poate exista între valorile lui ρ , mergînd pînă la 10^{26} , aceste denumiri sînt justificate.

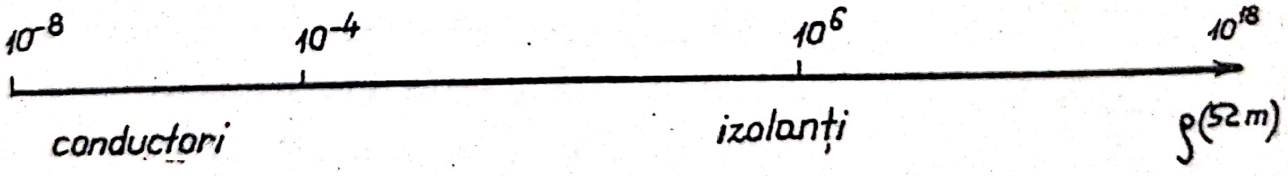


Fig. 6-4

In tabelul 6-1 se prezintă exemple privind rezistivitatea şi alte caracteristici electrice ale unor materiale uzuale, pentru orientare.

T A B E L nr. 6-1

Material	Rezistivitate (.m) la 20°C	Conductivitate ($\frac{S}{m}$)($^{-1}_{m}$-1)	Coeficient de temperatură (1/°C) la 20°C
Argint	$1,59.10^{-8}$	$6,29.10^{7}$	$3,8.10^{-3}$
Cupru pur	$1,69.10^{-8}$	$5,91.10^{7}$	$3,9.10^{-3}$
Cupru comercial	$1,73.10^{-8}$	$5,77.10^{7}$	-
Aluminiu	$2,82.10^{-8}$	$3,53.10^{7}$	$3,9.10^{-3}$
Fier	2.10^{-7}	5.10^{6}	5.10^{-3}
Mercur	$9,58.10^{-7}$	$1,04.10^{6}$	$8,9.10^{-3}$
Plumb	$2,2.10^{-7}$	$4,5.10^{6}$	$4,3.10^{-3}$
Constantan (Cu 60%,Ni 40%)	$4,9.10^{-7}$	$2,04.10^{6}$	2.10^{-6}
Manganină (Cu 84%,Mn 12%, Ni 4%)	$4,4.10^{-7}$	$2,28.10^{6}$	6.10^{-6} la 12°C -4.10^{-5} la 100°C
Nichelcrom (Ni 65%,Cr 12%, Fe 23%)	$1,1.10^{-6}$	9.10^{5}	2.10^{-4}
Germaniu	0,45	2,2	-3.10^{-2}
Siliciu	$6,2.10^{2}$	$1,6.10^{-3}$	
Apa de mare	0,3	3	
Apa distilată	$2,5.10^{5}$	4.10^{-6}	
Pământ	$10^{2} - 10^{4}$	$10^{-4} - 10^{-2}$	
Ulei de transformator	10^{11}	10^{-11}	
Sticla	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{-15} - 10^{-12}$	
Mica	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{-16} - 10^{-14}$	
Polistiren	10^{17}	10^{-17}	
Porţelan	10^{16}	10^{-16}	
Cuarţ topit	10^{18}	10^{-18}	
Chihlimbar	5.10^{18}	2.10^{-19}	
Feronichel (Fe 74%,Ni 25%, C 1%)	8.10^{-7}	9.10^{-2}	

6.3.2. Variația rezistivității cu temperatura

6.3.2.1. Cazul metalelor. Rezistivitatea acestora crește cu temperatura (fig.6-5), deoarece, datorită agitației termice, amplitudinea de vibrație a ionilor din care este compusă rețeaua crește, fapt în urma căruia crește și numărul de ciocniri dintre electroni și ioni.

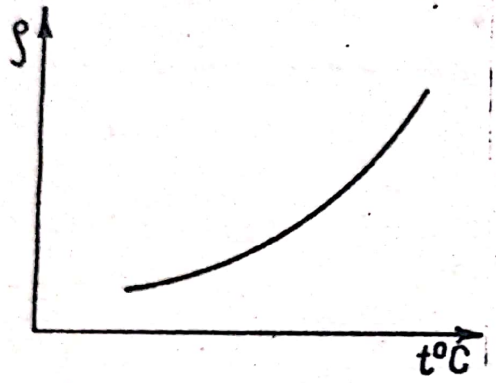


Fig. 6-5

Intr-un interval relativ mic de temperatură, de ordinul a 100°, rezistivitatea metalelor crește liniar cu temperatura după o lege de forma:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) , \qquad (6\text{-}27)$$

în care ρ_0 este rezistivitatea la temperatura inițială (0°C de exemplu), ρ - este rezistivitatea la temperatura t (100°C de exemplu), iar α este un coeficient de temperatură. care în cazul metalelor pure este aproximativ egal cu coeficientul de dilatare al gazelor ($\alpha \simeq 0{,}004$).

Pe baza acestei legi se construiesc așa numitele termometre cu rezistență; la construirea acestora se utilizează metale cu coeficient de temperatură mare.

In practică, cum temperatura conductoriler din care sînt confecționate diverse piese atinge 120°C și chiar mai mult, trebuie să se țină seama de creșterea rezistivității cu temperatura. Dacă acest fenomen deranjează mult, ca în cazul rezistențelor etalon, se utilizează conductori confecționați din diverse aliaje, deoarece α al aliajelor este cu mult mai mic decît al metalelor pure. Din tabelul nr. 6-1, se vede că în acest scop pot fi utilizate aliajele: constantan, manganina sau nichelcrom.

6.3.2.2. Supraconductibilitatea. La temperaturi din domeniul zecilor de grade Kelvin, rezistivitatea metalelor variază mai repede cu temperatura, după o lege în T^n, unde n poate fi de cîteva unităţi. Există însă metale a căror rezistivitate devine aproape nulă, - scade de cel puţin 10^9 ori - , cînd se găsesc la o temperatură apropiată de zero grade Kelvin (fig. 6-6). Fenomenul care are loc se numeşte supraconductibilitate şi a fost descoperit de Kamerlingh Onnes (1911 - 1921). Explicaţia stării supraconductoare, dată acum aproximativ cincisprezece ani, se sprijină pe existenţa unor interacţiuni complexe dintre electronii de conducţie şi reţeaua cristalină. Un metal devine brusc supraconductor la o anumită temperatură critică; în cazul metalelor Al, Pb, Te, aceasta este de 1,1°K , 7,3°K şi 11,2°K. O temperatură critică relativ ridicată o prezintă compuşii V_3Si ($T_c \simeq 17°K$), Nb_3Sn ($T_c \simeq 18°K$) .

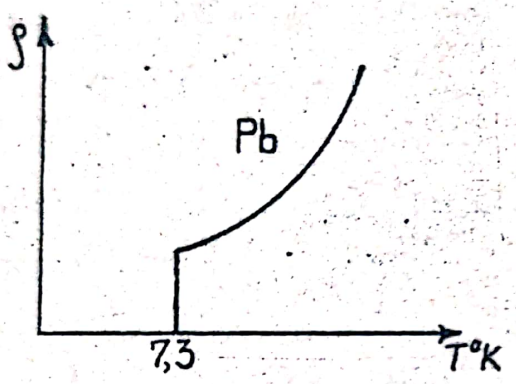


Fig. 6-6

Dacă substanţa se află într-un cîmp magnetic depăşind o anumită valoare, care depinde de temperatura la care se află eşantionul, supraconductibilitatea dispare. De exemplu, în cazul plumbului, cîmpul corespunzător trecerii de la starea supraconductoare la starea conductoare la temperatura de 5°K, este de aproximativ 0,05 tesla; la temperaturi mai coborîte, fenomenul are loc la inducţii mai ridicate (pînă la 0,1 T). Unele aliaje ale metalelor pămînturi rare rămîn supraconductoare în cîmpuri

foarte mari; de exemplu, cîmpul critic al aliajului niobiu - staniu poate fi de 8,8 tesla. Starea supraconductoare dispare datorită chiar inducţiei magnetice create de conductor, cînd este parcurs de un curent electric.

Densitatea maximă de curent care poate fi suportată de un fir supraconductor este de aproximativ 10^5 A/cm^2.

Supraconductibilitatea are diverse aplicaţii practice deosebit de interesante şi se întrevede să aibă şi unele aplicaţii importante din punct de vedere economic. Astfel, pe baza faptului că intensitatea unui cîmp magnetic poate să varieze ca valoare în jurul valorii cîmpului critic, se pot construi întrerupătoare comandate de la distanţă, cum este criotronul; în timpul funcţionării, rezistenţa dispozitivului variază de la o anumită valoare, la valoarea zero. In unele maşini moderne de calcul se utilizează asemenea dispozitive.

Pe baza aceluiaşi fenomen, se pot realiza, cu ajutorul unor bobine, cîmpuri magnetice de pînă la 10 tesla într-un volum de cîţiva centimetri cubi (cu molibden-reniu, sau niobiu-staniu). Se speră ca într-un viitor apropiat, fenomenul de supraconductibilitate să fie folosit la micşorarea pierderilor de energie în înfăşurările diverselor maşini şi a transformatorilor statici.

Observaţie. Temperaturile foarte joase la care are loc fenomenul de supraconductibilitate, se obţin prin lichefierea azotului (77°K), hidrogenului (20,4°K) şi heliului (4,2°K), prin evaporarea heliului sub presiune redusă (1°K) şi prin demagnetizarea adiabatică a sărurilor paramagnetice (0,001°K).

6.3.2.3. Cazul semiconductoarelor. Rezistivitatea acestora scade cu temperatura după o lege care se poate scrie sub forma:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{b}{T}} , \qquad (6-28)$$

unde b reprezintă o temperatură care este de aproximativ $2000^{\circ}K$-$4000^{\circ}K$.

Din relaţia de mai sus, rezultă imediat formula:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{b}{T^2}\Delta T , \qquad (6-29)$$

unde T se exprimă în grade Kelvin, din care rezultă că variaţia rezistivităţii cu temperatura în cazul semiconductorilor este mult mai mare decît în cazul metalelor, coeficientul de temperatură fiind negativ.

Scăderea rezistivităţii semiconductorilor cu creşterea temparturii se datorează structurii acestora, care este astfel încît densitatea purtătorilor de sarcină, - electroni sau goluri - , creşte mult cu agitaţia termică.

De exemplu, rezistivitatea grafitului ($\rho \simeq 7.10^{-6} \Omega.m$) scade la jumătate, cînd temperatura variază de la zero la $2000^{\circ}K$.

Unele ferite (spinelice: cu compoziţia M'_2O_3MO , unde M' este un metal bivalent din grupa fierului şi M un metal bivalent din grupa magneziului) ca Fe_2O_3MgO , Cr_2O_3MgO , sînt semiconductoare. Rezistivitatea acestora, care este de ordinul unui ohm-metru, scade la jumătate cînd temperatura creşte cu cîteva zeci de grade ($20^{\circ}C$ - $50^{\circ}C$). Rezistorii constituiţi din asemenea materiale, avînd coeficientul de temperatură negativ care poate varia cu pînă la 5% pe grad, se numesc termistori (sau CTN- coeficient de temperatură negativ). Aceste materiale se folosesc şi la realizarea unor termometre foarte sensibile în anumite intervale de temperatură.

6.3.3. Influenţa inducţiei magnetice asupra rezistivităţii

Există unele metale a căror rezistivitate creşte cînd se află într-o inducţie magnetică, datorită faptului că aceasta modifică traiectoria purtătorilor de sarcină. Efectul acesta, cunoscut sub denumirea de magnetorezistenţă, este deosebit de pronunţat în cazul bismutului; creşterea rezistivităţii Bi poate ajunge să fie de 5% într-o inducţie magnetică de 0,1 Wb/m^2. Datorită faptului că variaţia rezistivităţii bismutului este liniară cu inducţia magnetică, după ce aceasta depăşeşte valoarea de aproximativ 0,1 T (fig. 6-7), se construiesc sonde de bismut, care pot fi folosite la măsurarea inducţiilor magnetice mai mari de 0,1 T (pînă la ~ 10 T). In ultimii ani, aceste sonde sînt înlocuite cu succes de către sondele (generatorii) Hall.

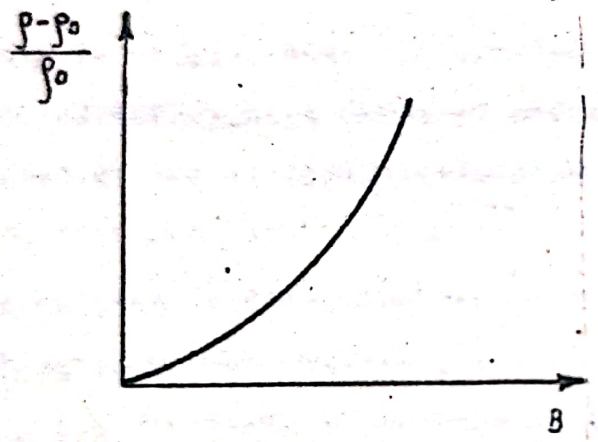


Fig. 6-7

Ambele tipuri de sonde prezintă avantajul de a permite măsurarea inducţiilor magnetice în spaţii restrînse (5 mm^3 - 100 mm^3). In fig. 6-7, cu ρ_0 s-a notat rezistivitatea firului de bismut în absenţa inducţiei magnetice.

6.3.4. Variaţia rezistivităţii cu cîmpul electric. Există semiconductori a căror rezistivitate scade odată cu creşterea tensiunii care se aplică la capetele rezistorului constituit din aceste materiale (fig. 6-8). Un asemenea semiconductor este car-

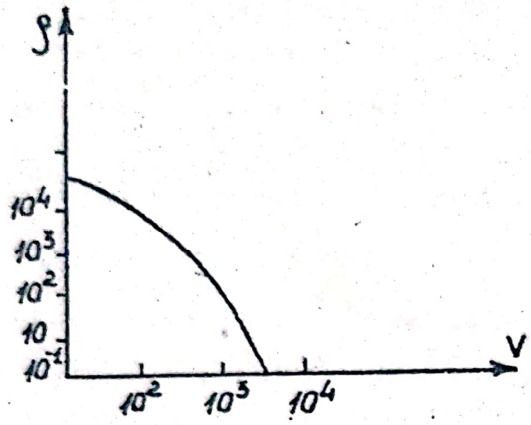


Fig. 6-8

bura de siliciu. Rezistoarele constituite din acești semiconductori se numesc <u>varistori</u> (R.V.T. - rezistențe variabile cu tensiunea) și se folosesc la protejarea contra supratensiunilor.

6.3.5. <u>Variația rezistivității sub acțiunea radiațiilor</u>. In general, rezistivitatea unui conductor și în mod deosebit a unui semiconductor, cum este seleniul, descrește cînd materialul din care este constituit rezistorul este supus acțiunii undelor electromagnetice. Acest efect, denumit <u>fotorezistență</u>, se datorează faptului că unii electroni, în schimbul energiei radiațiilor (absorbind fotoni) devin liberi și ca urmare crește densitatea purtătorilor de sarcină. Unele substanțe ca CdS, CdSe, CdTe sînt sensibile la radiațiile vizibile, în timp ce altele ca PbS, PbSe, PbTe sînt sensibile la radiațiile infraroșii.

6.3.6. <u>Variația rezistivității cu tensiunile mecanice</u>. Rezistența conductorilor constituiți din anumite metale cum sînt aliajele constantan, nicrom, etc., variază cu tensiunile mecanice pe care le suferă. In unele cazuri (constantan) variația relativă a rezistenței este aproximativ egală cu dublul variației relative a lungimii conductorului:

$$\frac{\Delta R}{R} \simeq \frac{2\Delta \ell}{\ell} \qquad (6\text{-}30)$$

Pe baza acestui efect se construiesc <u>joje de tensiune</u>, care sînt folosite ca <u>extenzometre</u>. O asemenea joja este constituită din fir subţire de constantan, etc., cu diametrul de ordinul zecilor de microni, dispus în zig-zag şi fixat pe faţă unei plăcuţe plate de dimensiuni reduse (milimetri). Aceste pastile se lipesc pe piesele care se alungesc, sau se scurtează, sub acţiunea unor acţiuni mecanice; din variaţia rezistenţei jojei , se poate măsura deformarea pieselor. Aceste joje mai pot fi folosite ca dinamometre sau ca manometre pentru măsurarea presiunilor foarte mari, mergînd pînă la 10^5 Kbar.

6.3.7. <u>Rezistenţe neohmice</u>

Curba I = f(V), care reprezintă intensitatea curentului printr-un rezistor în funcţie de diferenţa de potenţial aplicată la capetele acestuia, se numeşte "<u>caracteristica curent - tensiune</u>".

In cazul cînd rezistenţa nu depinde de intensitatea curentului care străbate rezistorul, sau de tensiunea aplicată la capete şi se supune deci legii lui Ohm, se numeşte <u>rezistenţă ohmică</u>; caracteristica curent-tensiune a unei rezistenţe ohmice este o dreaptă (fig. 6-9 a).

Există însă dispozitive, cum sînt diodele de diverse tipuri (fig. 6-9 b) a căror caracteristică curent-tensiune nu este liniară. In cazul acestor sisteme, rezistenţa se defineşte, obişnuit, în fiecare punct al caracteristicii.

$$R = \frac{dV}{dI} \quad , \qquad (6\text{-}31)$$

şi se spune că dispozitivul prezintă o rezistenţă neohmică.

In cazul cînd un sistem are o caracteristică, sau porţiuni din aceasta, cu pantă negativă, se spune că sistemul prezintă o rezistenţă negativă; asemenea dispozitive sînt termistorii, unele diode etc. (fig. 6.9 e.f).

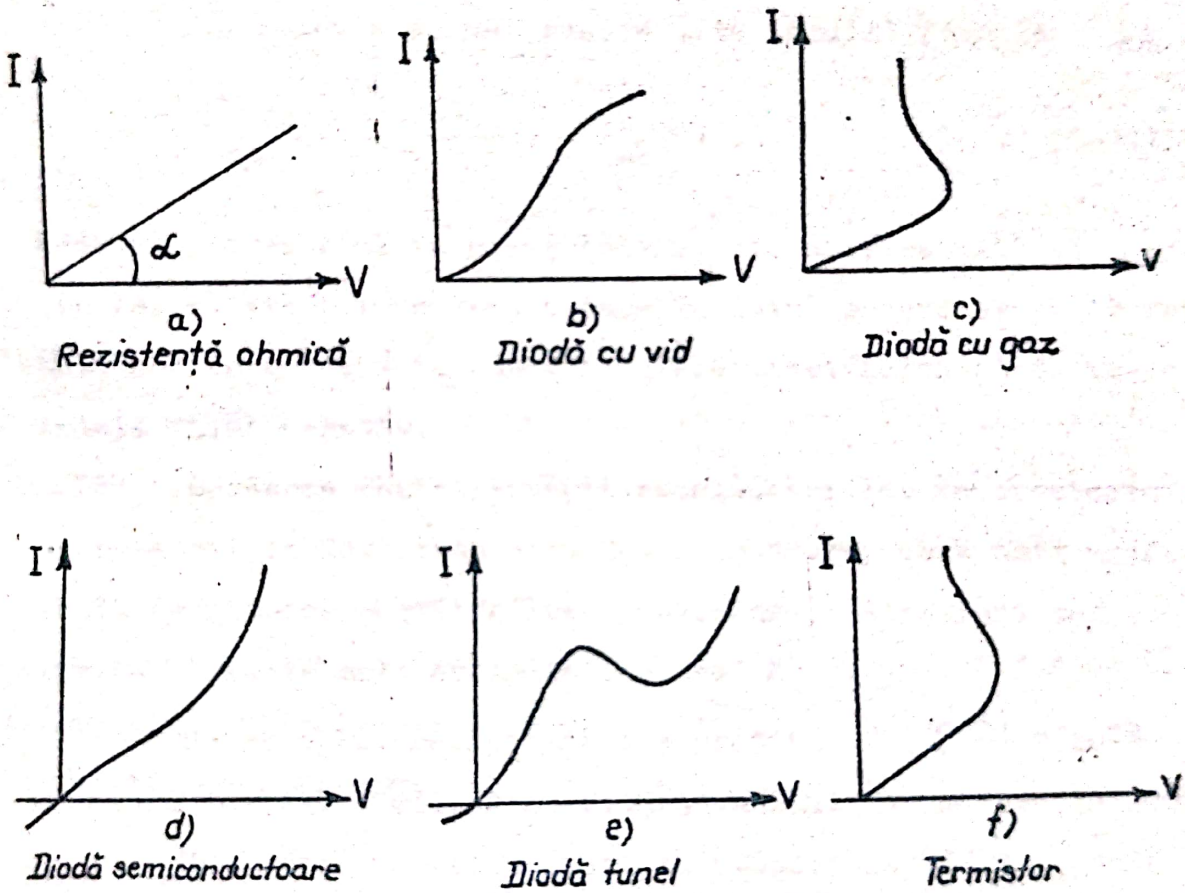


Fig. 6-9

6.4. Energia şi puterea în curent continuu

Din electrostatică (1.5.5), se ştie că prin deplasarea unei sarcini punctiforme Q dintr-un punct din spaţiu unde potenţialul este V_A în alt punct unde potenţialul este V_B, datorită forţelor electrostatice se produce un lucru a cărui expresie este:

$$W = Q(V_A - V_B)$$

In cazul unui circuit electric fără ramificaţii, conţinînd un generator la bornele căruia tensiunea este $V_A - V_B$, sarcinile electrice libere se deplasează, în porţiunea de circuit exterioară generatorului, sub acţiunea unui cîmp electrostatic, suferind o cădere de potenţial egală cu $V_A - V_B$. Prin micşorarea energiei potenţiale a sarcinii electrice Q transportate de curentul de intensitate I, care parcurge porţiunea de circuit considerată într-un oarecare t, se dispune de o energie electrică care se transformă, după principiul conservării energiei, în alte forme de energie: în energie calorică (totdeauna), în energie mecanică (în cazul unui motor), în energie chimică (în cazul unei cuve electrolitice), în energie cinetică a purtătorilor de sarcină, în cazul trecerii curentului prin gaze la presiune redusă.

Considerînd că regimul este permanent şi ţinînd seama că $Q = I.t$, se poate scrie relaţia care exprimă <u>energia electrică</u> disponibilă în porţiunea de circuit exterioară generatorului, cînd aceasta este parcursă de un curent de intensitate I un timp oarecare t:

$$W_{AB} = (V_A - V_B)\, I\, t \qquad (6\text{-}32)$$

<u>Puterea electrică</u> de care se dispune în aceleaşi condiţii, furnizată de generator, are expresia:

$$P = \frac{W_{AB}}{t} = (V_A - V_B)\, I \qquad (6\text{-}33)$$

<u>Observaţii</u>. 1. In cazul curentului alternativ, membrul drept al expresiei conţine încă un factor care depinde de componenţa circuitului şi de pulsaţia curentului.

2. Generatorul de energie electrică, făcînd parte din circuit, este traversat de asemenea de curentul electric ca şi porţiunea de circuit exterioară acestuia. In generator însă, sarcinile electrice sînt deplasate astfel că trec de la un potenţial mai coborît (V_B) la un potenţial mai înalt (V_A) ; adică generatorul face să existe în circuit o energie electrică disponibilă care se transformă în altă formă de energie. Generatorul nu creează însă energie electrică din nimic, aceasta provine din transformarea unei alte forme de energie: din energie chimică (în cazul elementelor galvanice), mecanică (în cazul dinamurilor), termică (în cazul pilelor termoelectrice), electrică (în cazul transformatorilor).

6.5. Efectul Joule

6.5.1. Definiţie. Efectul Joule constă în faptul că la trecerea curentului electric, prin orice conductor, se degajă căldură. Referindu-ne la cazul unui conductor metalic, efectul se explică la scară microscopică, prin ciocnirea dintre electroni şi ionii reţelei din care este constituit metalul. Un electron, după o ciocnire cu un ion, capătă, - sub acţiunea cîmpului electric - , o energie cinetică pe care o cedează altui ion la ciocnirea următoare. Energia cedată de electroni apare sub formă de agitaţie termică a ionilor reţelei, adică se transformă în căldură şi conductorul se încălzeşte.

6.5.2. Legea lui Joule locală. Aşa cum s-a procedat deja (6.1.1), efectul ciocnirilor dintre electroni şi ionii reţelei asupra mişcării electronilor, se poate interpreta ca o forţă de frecare. Intrucît, aşa cum s-a arătat (6.1.2), forţa de inerţie a electronului este neglijabilă, iar forţa de frecare

$\vec{F}_f = -a\vec{v}$ este egală şi de sens opus cu forţa de natură electrică, $\vec{F}_e = e\vec{E}_s$, rezultă că lucrul forţei electrice fiind egal cu acel al forţei de frecare, se transformă total şi ireversibil în căldură.

Pentru a găsi legătura cantitativă a acestui efect, ne vom referi la unitatea de volum, ţinînd seama că acsasta conţine n purtători de sarcină liberi (electroni), care se deplasează cu viteza $\vec{v}$.

Lucrul forţelor de frecare, $\vec{F}_f$, care se transformă în căldură în timpul dt este dat de relaţia

$$dQ = n\vec{F}_f.\vec{v}dt = -na\vec{v}.\vec{v}\,dt = -n\,av^2dt$$

Deoarece $-a\vec{v} = e\vec{E}_s$, se poate scrie:

$$dQ = n\,e\vec{E}_s\vec{v}\,dt = n\,e\vec{v}.E_s\,dt = \vec{i}.\vec{E}_s\,dt \quad ,$$

căci $\vec{i} = n\,e\,\vec{v}$.

Relaţia

$$P = \frac{dQ}{dt} = \vec{i}.\vec{E}_s = \rho\, i^2 = \frac{i^2}{\sigma} = \sigma E_s^2 . \qquad (6\text{-}34)$$

exprimă puterea disipată sub formă de legătură pe unitatea de volum şi reprezintă <u>legea lui Joule locală</u>. Adică energia electrostatică a sarcinilor electrice $(\vec{E}_s.\vec{i})$ este egală cu energia termică disipată prin efecul Joule (i^2/σ).

6.5.3. <u>Legea lui Joule integrală</u>. Cele expuse în paragrafele anterioare şi relaţia (6-32) permit să se afirme că în cazul unei porţiuni de circuit constituite dintr-o rezistenţă pur ohmică (pasivă) R , la capetele căreia este aplicată o diferenţă de potenţial $V_A - V_B$, fiind parcursă de un curent de intensitate I un timp oarecare t , căldura q disipată de conductor se poate calcula după formula:

$$q = (V_A - V_B) I \, t \, , \qquad (6\text{-}35)$$

care este la fel cu relaţia (6-32). Formula (6-35), dacă mărimile din membrul drept sînt măsurate în unităţi din sistemul SI, permite să cunoaştem cantitatea de căldură provenită din energia electrică, exprimată în unităţi de energie ale aceluiaşi sistem (în Joule). In cazul cînd căldura se cere exprimată în calorii, restul mărimilor fiind exprimate în unităţile sistemului SI, atunci formula precedentă se scrie:

$$q_{cal.} = \frac{1}{J} (V_A - V_B) I \, t \, , \qquad (6\text{-}36)$$

unde $J = 4{,}186.10^3$ Joule/calorie mare, este echivalentul mecanic al caloriei.

Tinînd seama de legea lui Ohm integrală pentru o porţiune de circuit care este constituită dintr-o rezistenţă pasivă (6-24), şi notînd $V_A - V_B = V$, relaţia (6-35) devine:

$$\boxed{q = RI^2 t} \, , \qquad (6\text{-}37)$$

care reprezintă <u>legea lui Joule sub formă integrală</u>. Cantitatea de căldură, disipată pe un conductor pasiv, în care s-a transformat integral energia electrică, este proporţională cu rezistenţa porţiuniii de circuit, cu pătratul intensităţii curentului care o parcurge şi cu timpul cît acesta o străbate.

Verificarea experimentală a acestei legi se face prin calorimetrie, variind, - pe rînd - , unul dintre cei trei factori din membrul drept al relaţiei (6-37). Factorii R, I şi t se măsoară cu un ohmetru (sau cu o metodă oarecare de măsurare a rezistenţelor), un ampermetru şi un cronometru.

Experienţa descrisă în paragraful (6.2) permite să se pună în evidenţă efectul Joule,care este, dealtfel, foarte cunoscut din viaţa cotidiană. Dacă în această experienţă, firul de fier este galvanizat, la un moment dat, cînd intensitatea curentului este atît de mare încît temperazura firului atinge o anumită valoare, zincul se aprinde brusc şi arde în flăcări albăstrui.

Legea lui Joule (6-37) se mai poate scrie şi sub forma:

$$q = V\,I\,t = \frac{V^2}{R}\,t \qquad (6\text{-}38)$$

Puterea disipată prin efect Joule, de către o rezistenţă pur ohmică parcursă de curent continuu, are deci ca expresie:

$$P = V\,I = R\,I^2 = \frac{V^2}{R} \qquad (6\text{-}39)$$

Expresia $P = \frac{V^2}{R}$ se utilizează în cazurile cînd tensiunea aplicată la bornele conductorului rămîne constantă, independent de intensitatea curentului care-l parcurge. Aceasta pune în evidenţă un caz particular, care are loc cînd valoarea rezistenţei R este foarte mică (fracţiuni de ohm), cunoscut în practică sub denumirea de <u>scurt circuit</u>. Puterea transformată în căldură, prin efect Joule, în acest caz poate fi atît de mare încît să fie dăunătoare.

<u>Observatii</u>. 1. In cazul unei porţiuni de circuit constituită dintr-un generator sau receptor, o parte din energia electrică se transformă de asemenea în căldură, aceasta fiind proporţională cu rezistenţa interioară care le este caracteristică; nu poate exista nici un element electric activ sau pasiv care să nu aibă rezistenţă proprie.

2. Legea lui Joule se poate aplica şi în cazul unui curent a cărui intensitate i variază în timp, numai dacă se consideră că timpul are o durată dt atît de mică încît în acest interval de timp valoarea instantanee i a intensităţii curentului electric rămîne constantă:

$$dq = u\, i\, dt = R\, i^2\, dt \qquad (6\text{-}40)$$

iar,

$$q = \int_{t_1}^{t_2} u\, i\, dt \; ; \qquad (6\text{-}41)$$

în relaţia de mai sus, u reprezintă valoarea instantanee a tensiunii electrice aplicate la capetele conductorului de rezistenţă R . Aceste consideraţii vor fi dezvoltate în cazul curentului alternativ sinusoidal.

6.5.4. Efectul Joule în practică.

6.5.4.1. Aplicaţii. Efectul Joule are unele aplicaţii practice, dintre care două sînt mai importante.

a. Pe baza acestui efect se construiesc cuptoare de tipuri şi pentru scopuri foarte variate, precum şi diverse aparate electrice de uz casnic.

Pentru încălzit se folosesc fire din metale care nu se oxidează uşor ca NiCr, Pt şi care pot suporta temperaturi ridicate (1000-1700°C). Un radiator electric poate avea puterea de la cîteva zeci de watt la mii de watt.

b. Acest efect este utilizat de asemenea la iluminatul electric. Prin încălzirea pînă la aducerea la incandescenţă a unui fir conductor închis într-un balon de sticlă, în care s-a făcut vid pentru a se înlătura oxidarea şi pierderea de căldură prin convenţie, o parte din energia electrică se transformă

în energie radiantă sub formă de radiaţii vizibile. Este convenabil ca firul conductor folosit să fie construit dintr-un material care să suporte temperatură cît mai ridicată; singurul material folosit pe scară largă este tungstenul a cărui temperatură de topire este de 3100°C. Introducîndu-se un gaz inert, ca argonul, pentru a reduce viteza de sublimare a filamentului, s-a ajuns să se ridice temperatura acestuia pînă la 2600° - 2700°C; pentru micşorarea pierderilor de căldură prin conducţie şi convenţie, firul se dispune în balon în diverse moduri (se evită, în general, desfăşurarea acestuia pe lungimi mari). S-a ajuns astfel, la un moment dat, ca randamentul acestor becuri să fie de 15-20 lumeni pe watt. Utilizarea kriptonului, - care, avînd o masă atomică de peste două ori mai mare decît a argonului (87/40), are o conductibilitate termică mai mică - , a condus la rezultate şi mai bune. Becurile cu incandescenţă tind să fie înlocuite cu lămpile care funcţionează pe baza fenomenului de luminiscenţă, întrucît sînt mai convenabile. Lămpile cu incandescenţă recîştigă însă terenul prin varianta becurilor cu iod, în care, datorită unui proces de descompunere a unei ioduri de tungsten (I_2W) metalul evaporat este redepus pe filament; în acest fel s-a putut urca temperatura filamentului pînă la 2900°C şi randamentul pînă la 30 lumeni pe watt, durata de viaţă rămînînd aceeaşi (circa 1000 ore).

c. Pe baza efectului Joule se construiesc ampermetre şi voltmetre. Principiul de construcţie al acestora se desprinde din schema prezentată în fig. 6-10. Curentul electric trece prin firul (1) - numit punte -; acesta este confecţionat dintr-un metal care suportă temperaturi mari şi are un coeficient de dilatare mare şi o rezistenţă mecanică mare (Ag,Pt,Cu,Ir,etc).

Firul (2) este din metal (bronz fosforos), iar firul

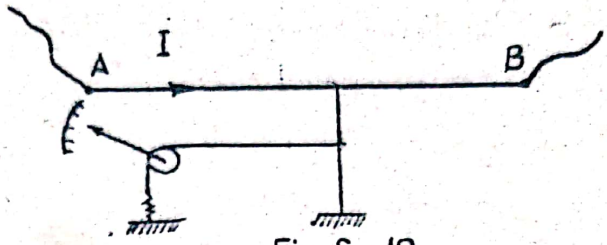


Fig. 6 - 10

(3) din mătase; se înfăşoară sub formă de ochi pe scripetele (4) şi se cuprinde cu al doilea capăt de arcul (5). Cînd puntea se încălzeşte şi se dilată, arcul întinde cele trei fire şi face să se traducă alungirea firului (1) printr-o rotaţie α a acului indicator (6). Deoarece variaţia temperaturii este proporţională cu I^2 ($\Delta\theta \simeq K' I^2$), iar alungirea este proporţională cu creşterea temperaturii ($\Delta\ell \sim K'' \Delta\theta$) şi deviaţia acului indicator este proporţională cu $\Delta\ell$, rezultă

$$\alpha = KI^2$$

Aceste instrumente au jucat un rol important la măsurarea intensităţii şi tensiunii curentului alternativ de frecvenţă înaltă ($f > 10^6$ Hz), în special datorită faptului că prezintă o capacitate electrică neglijabilă. Întrucît însă consumă mult şi sînt fragile, sînt înlocuite în prezent cu alte tipuri de instrumente electrice.

La un alt tip de aparate termice, efectul Joule este utilizat după cum indică schema din fig. 6-11.

O perlă de sticlă (1) (cu diametrul de zecimi de milimetru) este prinsă de mijlocul unui fir subţire din metal (2) şi în interiorul acesteia pe fir se sprijină sudura caldă a unui

termocuplu. Termocuplul este conectat la un instrument magnetoelectric care măsoară t.e.m. termoelectrică în funcţie de în-

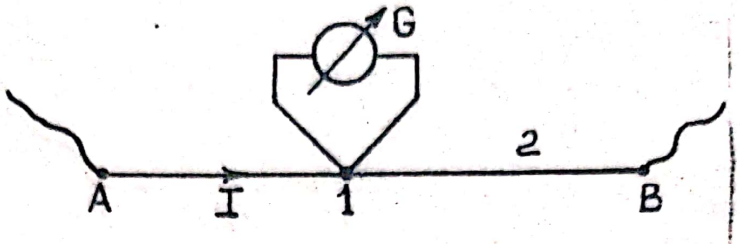


Fig. 6-11

călzirea firului şi deci de intensitatea curentului care îl traversează (de măsurat). Pentru ca măsurarea să fie bună, este necesar să se asigure echilibrul termic; de aceea, firul metalic este plasat într-un bec în care s-a făcut vid şi lectura pe scara instrumentului se face după cîteva secunde de la închiderea circuitului.

d. <u>Siguranţe fuzibile</u>. Un fir conductor se încălzeşte atunci cînd este parcurs de un curent electric. Temperatura acestuia creşte în timp, dacă intensitatea rămîne constantă, într-un mod care depinde de izolarea sa termică. In cazul cînd conductorul este izolat termic, - dacă cantitatea de căldură q degajată în unitatea de timp prin efectul Joule este Q/t - , temperatura acestuia creşte în unitatea de timp cu o cantitate calculabilă prin formula:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{1}{m\,c}\,\frac{q}{t} \quad , \qquad (6\text{-}42)$$

în care <u>m</u> este masa conductorului şi <u>c</u> este căldura specifică a materialului din care este construit.

Cînd firul conductor nu este izolat termic, sau izolat astfel încît poate avea loc o pierdere de căldură în exterior,

pri- conducţie, convecţie şi radiaţie, temperatura acestuia creşte în timp pînă cînd cantitatea de căldură pierdută în unitatea de timp devine egală cu cantitatea de căldură provenită prin efectul Joule în unitatea de timp. In acel moment, firul se află în echilibru termic şi temperatura acestuia este staţionară.

Cînd condiţiile de pierdere a căldurii rămîn constante, temperatura staţionară creşte cu intensitatea curentului. De aceea, în practică, se precizează pentru orice conductor sau aparat electric, intensitatea maximă a curentului care îl poate parcurge în anumite condiţii pentru a nu atinge o temperatură staţionară superioară aceleia care nu-i schimbă proprietăţile. Un curent de intensitate superioară intensităţii maxime definite mai sus, poate deteriora sau distruge conductorul (aparatul). Astfel, printr-un fir de cupru cu diametrul aproximativ de 1 mm, se poate trece un curent de 7 amperi dacă se află în aer şi numai 3-4 amperi dacă este izolat şi face parte dintr-o bobină. In cazul liniilor de transport electrice, dacă firul este în aer liber, densitatea de curent admisă este de circa 6 A/mm^2 , iar dacă firul este în zid, densitatea de curent poate fi numai de 4 A/mm^2.

Din cele de mai sus rezultă că efectul Joule poate fi utilizat la realizarea de dispozitive pentru protecţia unui circuit electric contra unui curent electric de intensitate prea mare, care ar putea deteriora vreunul din elementele sale componente. Acestea sînt constituite din fire de metale care se topesc la temperaturi coborîte, cum este plumbul. Atît timp cît temperatura staţionară stabilită T_s este permisă , firul de plumb rezistă (fig. 6-12); dacă în urma unui scurt-

circuit, comis din neatenţie sau din alte motive, intensitatea

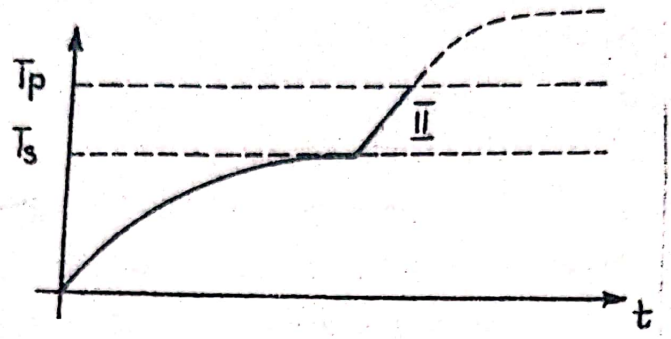


Fig. 6-12

curentului de pe circuit întrece valoarea intensităţii maxime admise, firul de plumb (siguranţa) se topeşte (T_p) şi întrerupe circuitul înaintea stabilirii noului echilibru termic (fig. 6-12).

Siguranţele fuzibile sînt aproape complet înlocuite în practică cu siguranţe automate, numite disjunctoare, care permit restabilirea curentului într-un timp foarte scurt, prin o apăsare pe buton; funcţionarea acestor siguranţe se bazează pe forţe de natură electromagnetică.

6.5.4.2. Urmările dăunătoare ale efectului Joule. Acest efect se arată nedorit, pentru că o parte din energia electrică de folosit se pierde inevitabil şi ireversibil sub formă de căldură.

a. Astfel randamentul liniilor de transport a energiei electrice este subunitar, întrucît o parte din puterea electrică furnizată la intrarea liniei $P = VI$, se pierde sub formă de căldură prin efect Joule, $p = RI^2$. Notînd cu P' puterea electrică disponibilă la ieşirea din linie, se poate scrie expresia randamentului în energie a liniei de transport:

$$\eta = \frac{P'}{P} = \frac{P-p}{P} = \frac{P-RI^2}{P} = 1 - R\frac{I^2}{P}\ ; \qquad (6\text{-}43)$$

ţinînd seama că $P = VI$, expresia randamentului se mai poate scrie:

$$\boxed{\eta = 1 - P\frac{R}{V^2}} \qquad (6\text{-}44)$$

Relaţiile de mai sus arată că η creşte cînd rezistenţa liniei scade, - ceea ce necesită conductori groşi (deci scumpi) şi piloni de susţinere solizi - , şi că pentru aceeaşi putere, η creşte cînd V este mare; de aceea transportul energiei electrice la distanţe se face la tensiuni înalte (15000 - 200000 V).

b. In acelaşi timp, efectul Joule duce la limitarea intensităţii curentului prin conductorii din care sînt construite diversele maşini, - densităţile de curent permise fiind de circa 3 A/mm^2 - 5 A/mm^2 - , pentru a nu altera izolanţii cu care sînt acoperiţi, aceştia putînd suporta pînă la maximum 120°C şi excepţional pînă la 180°C. De aceea, conductorii capătă dimensiuni mari, - ceea ce îi face incomozi şi duc la creşterea preţului de cost - ; totodată, este necesar să se anexeze diverse sisteme de răcire care de asemenea sînt jenante şi costisitoare.

c. Deoarece pierderile Joule sînt proporţionale cu rezistenţa, contactele nereuşite (conductorii se ating într-un număr mic de puncte) trebuie evitate.

6.6. Legea lui Ohm generalizată. Generatori. Receptori

6.6.1. Cîmp electromotor. Am văzut că într-o porţiune de circuit constituită dintr-o rezistenţă pasivă, parcursă de un curent electric, asupra unei particule purtătoare de sarcină (electronului) acţionează două forţe care într-un regim permanent îşi fac echilibru

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad \text{şi} \quad \vec{F}_f = -a\vec{v}$$

Referindu-ne la schema din fig. 6-13, dacă se evaluează circulaţia vectorului densitate de curent $\vec{i}$ de-a lungul unei linii de curent Γ care străbate întregul circuit, elementul de curent $d\vec{\ell}$ fiind coliniar şi de acelaşi sens cu $\vec{i}$, rezultă că

$$\oint_\Gamma \vec{i}.d\vec{\ell} \neq 0 \qquad (6\text{-}45)$$

întrucît produsul $\vec{i}.d\vec{\ell} > 0$ în fiecare punct.

Insă, într-o porţiune de circuit constituită dintr-o rezistenţă pasivă ACB, ştim că este valabilă legea lui Ohm

$$\vec{i} = \sigma\vec{E}_s$$

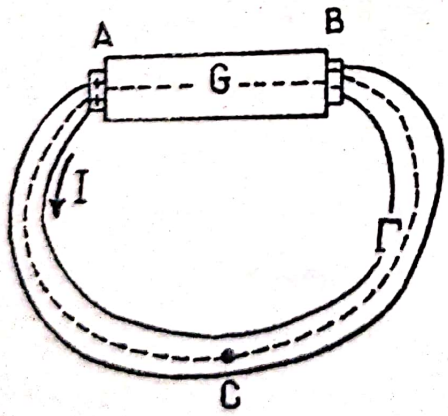


Fig. 6-13

Presupunînd că această lege este valabilă în fiecare punct al circuitului, - nu numai în interiorul conductorului ACB -, ar rezulta că:

$$\oint_\Gamma \vec{i}.d\vec{\ell} = \oint_\Gamma \sigma.\vec{E}_s.d\vec{\ell} = 0\,, \qquad (6\text{-}46)$$

după cum se ştie (1-64), ceea ce este în contradicţie cu relaţia (6-45).

Deci în porţiunea de circuit BA , constituită din generatorul G de pe circuit, ar trebui să acţioneze în mod necesar încă o forţă, $\vec{F}_m$, care să determine deplasarea sarcinilor electrice libere (considerate pozitive) în această porţiune de circuit de la B la A .

De-a lungul unui circuit închis, lucrul forţei $\vec{F}_e$ este nul, iar lucrul forţei $\vec{F}_f$ este negativ. Ca să existe un regim permanent de deplasare a purtătorilor de sarcină pe circuit, este deci necesar să acţioneze o a treia forţă, - care să producă un lucru pozitiv , cînd $q > 0$.

Dacă circuitul este deschis, $I = 0$, în generator va acţiona o forţă care se exercită asupra fiecărei sarcini libere din partea celorlalte sarcini, ca în electrostatică şi <u>forţa motrice</u> $\vec{F}_m$, produsă de generator, care îi face echilibru căci sarcinile libere nu se deplasează, deci, dacă

$$\vec{F}_e = q\,\vec{E}_s \quad \text{şi} \quad \vec{F}_e + \vec{F}_m = 0 \ , \qquad (6\text{-}47)$$

rezultă că forţa motrice $\vec{F}_m$ este de asemenea proporţională cu q şi că poate fi scrisă sub forma:

$$\vec{F}_m = q\,\vec{E}_m \ , \qquad (6\text{-}48)$$

unde E_m este un cîmp de altă natură şi cu alte proprietăţi decît E_s , care este creat de generatori prin mecanisme diferite şi care este o caracteristică a generatorului. Acest cîmp, numit <u>cîmp electromotor</u>, care determină deplasarea (electronilor) purtătorilor de sarcină în întregul circuit, există numai în generator, - caracterizîndu-i proprietăţile electrice locale în

fiecare punct - , şi circulaţia sa pe întregul circuit, - ca şi între polii generatorului - , nu este nulă; adică $\vec{E}_m$ nu derivă dintr-un potenţial uniform ca $\vec{E}_s$.

6.6.2. Legea lui Ohm generalizată, sub formă locală. In cazul unui regim permanent de curent, întrucît un purtător de sarcină se deplasează cu o viteză constantă, cele trei forţe care acţionează asupra acestuia îşi fac echilibru:

$$\vec{F}_e + \vec{F}_f + \vec{F}_m = 0 \qquad (6\text{-}49)$$

In cazul unei porţiuni de circuit constituite dintr-un conductor pasiv, $\vec{F}_m = 0$ şi în fiecare punct al acesteia este valabilă relaţia $\vec{i} = \sigma \vec{E}_s$.

Intr-un generator parcurs de curent, asupra purtătorului de sarcină acţionînd cele trei forţe, ecuaţia (6-49) conduce să se scrie:

$$q(\vec{E}_s + \vec{E}_m) = a\,\vec{v} \qquad (6\text{-}50)$$

Deoarece $\vec{i} = \rho \vec{v}$ (5-4), - unde ρ este densitatea volumică de sarcină - , şi $\frac{\rho q}{a} = \sigma$ (6-4) ecuaţia (6-50) devine:

$$q(\vec{E}_s + \vec{E}_m) = \frac{a}{\rho}\,\vec{i}$$

de unde rezultă direct Legea lui Ohm generalizată sub formă locală,

$$\vec{i} = \sigma(\vec{E}_s + \vec{E}_m) \qquad (6\text{-}51)$$

care este valabilă în fiecare punct interior generatorului şi care se reduce la expresia $\vec{i} = \sigma \vec{E}_s$ în porţiunea de circuit constituită dintr-un conductor pasiv.

Legea lui Ohm sub această formă rămîne valabilă şi în

cazul curenţilor variabili, dacă ne referim la un moment dat.

6.6.3. Tensiune electromotoare. Dacă printr-un circuit electric care conţine un generator nu circulă curent, se spune că generatorul este în circuit deschis sau că funcţionează în gol (în vid).

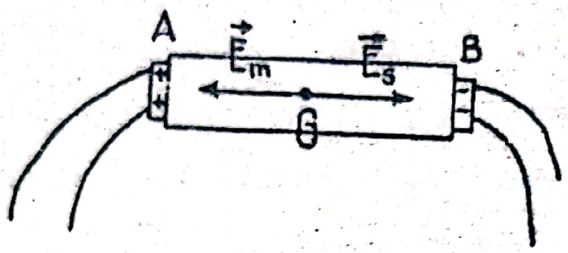


Fig. 6 - 14

Sensul cîmpului electrostatic $\vec{E}_s$ arată că în extremitatea stîngă a generatorului s-au acumulat sarcini pozitive şi în extremitatea dreaptă sarcini negative. Aceste două extremităţi, - prevăzute cu borne - , se numesc polii generatorului; unul din aceştia, care se află la potenţial mai ridicat, se numeşte pol pozitiv (A), iar celălalt se numeşte pol negativ (B) (fig. 6-14).

In aceste condiţii (fig. 6-14),

$$\vec{E}_s = - \vec{E}_m \qquad (6\text{-}52)$$

Diferenţa de la capetele porţiunii de circuit, exterioare generatorului, constituită dintr-o rezistenţă pasivă R , este egală cu d.d.p. de la bornele generatorului (piesele metalice extreme ale polilor prin care generatorul se conectează în circuit) fig. (6-13); expresia acesteia este (6-16):

$$(V_A - V_B) = \int_A^B \vec{E}_s d\vec{\ell} = \int_A^B \vec{E}_s d\vec{\ell} \qquad (6\text{-}53)$$

Cînd circuitul este deschis, ţinînd seama de relaţia (6-52), se poate scrie:

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E}_s d\vec{\ell} = \int_B^A \vec{E}_m d\vec{\ell} \qquad (6\text{-}54)$$

Prin definiţie,

$$\mathcal{E} = \int_B^A \vec{E}_m d\vec{\ell} \qquad (6\text{-}55)$$

este expresia matematică a unei mărimi care caracterizează un generator în ceea ce priveşte capacitatea acestuia de a întreţine un curent pe un circuit.

Deci t.e.m. a unui generator este egală cu circulaţia cîmpului electromotor de la polul negativ la polul pozitiv (pentru ca $\mathcal{E}$ să aibă valoare pozitivă); după relaţia (6-54), aceasta are aceeaşi valoare ca şi d.d.p. de la borne în circuit deschis. Aceeaşi relaţie arată că $\mathcal{E}$ este o mărime de aceeaşi natură ca şi V ; aceasta se măsoară deci în volţi.

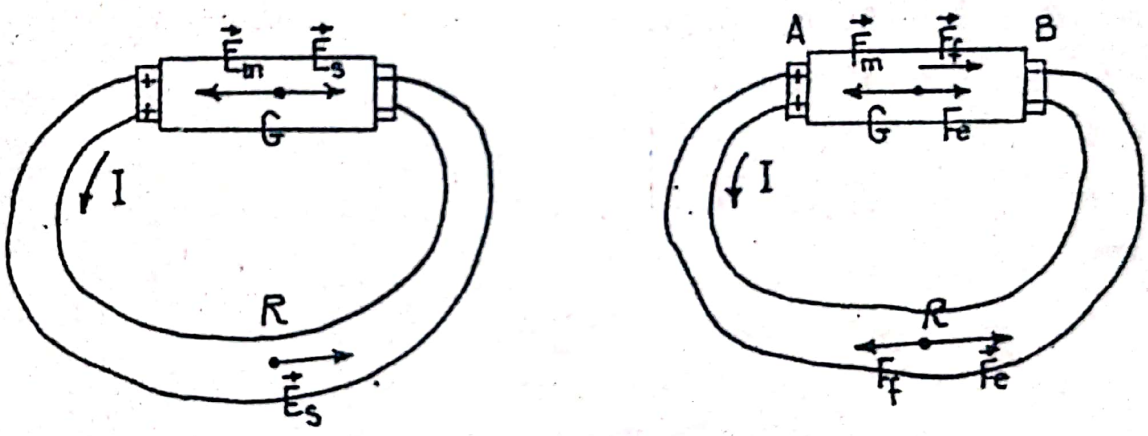
6.6.4. Legea lui Ohm generalizată pentru o porţiune de circuit

6.6.4.1. Porţiune de circuit constituită dintr-un generator

6.6.4.1.1. Rezistenţa interioară a generatorului. In circuit deschis, vectorii $\vec{E}_s$ şi $\vec{E}_m$ sînt egali şi direct opuşi (fig. 6-41), determinînd un gen de echilibru asemenea cu acela din electrostatică, determinat de condiţia $\vec{E}_s = 0$ Cînd circuitul electric este închis, prin acesta circulă un curent electric: în acest caz se spune că generatorul este în circuit închis sau că funcţionează în sarcină. De această dată, cele trei forţe care acţionează asupra fiecărui purtător de sarcină din interiorul generatorului îşi fac echilibru, după cum în afara acestuia, - dacă restul circuitului este constituit dintr-o rezistenţă pa-

eivă - , îşi fac echilibru numai cele două forţe care acţionează, $\vec{F}_m$ fiind nulă, căci s-a stabilit un regim permanent (fig. 6-15 a).

Considerînd că t.e.m. a unui generator este constantă, fiind independentă de intensitatea curentului debitat, - ceea ce poate avea loc datorită constituţiei generatorului, sau condiţiilor în care funcţionează (intensitate mică a curentului debitat) - , tot constant va fi şi cîmpul electromotor. Deoarece purtătorii de sarcină în generator se deplasează de la polul negativ la polul pozitiv (de la B la A, fig. 6-15 b) .



b) Fig. 6-15 a)

rezultă că atunci cînd un generator face ca să circule un curent pe circuit, în interiorul acestuia $\vec{E}_s$ scade ca valoare, în modul ca cele trei forţe să-şi facă echilibru (fig. 6-15 a).

In cazul unei porţiuni de circuit constituite dintr-o rezistenţă pasivă R , parcursă de curent de intensitate I , - după cum s-a arătat (6.2) - , se poate scrie:

$$(V_A - V_B)_R = RI = \int_A^B \vec{E}_s d\vec{l} \qquad (6\text{-}56)$$

Experienţa arată că o porţiune de circuit constituită dintr-un generator, dacă este parcursă de curent, degajă căldură. Aceasta permite să se considere că un generator are o rezistenţă ohmică proprie R_o , - numită <u>rezistenţă interioară</u> , - care îi este caracteristică. Un element galvanic are în mod curent o rezistenţă interioară de ordinul ohmilor (pila Weston are $R_o \simeq 10^3\Omega$), iar un acumulator poate avea $R_o \simeq 10^{-3}\Omega$.

Raţionamente analoage cu cele făcute în paragraful (6.2), conduc la aceeaşi concluzie.

Deci pentru o porţiune de circuit constituită dintr-un generator, a cărui rezistenţă interioară este R_o , - dacă se ţine seama de relaţiile (6-16), (6-51), (6-55) şi integrînd în sensul curentului, se poate scrie:

$$R_o I = \int_B^A (\vec{E}_s + \vec{E}_m)d\vec{l} = V_B - V_A + \mathcal{E} \qquad (6\text{-}57)$$

sau,

$$(V_A - V_B)_G = \mathcal{E} - R_o I \qquad (6\text{-}58)$$

Expresia (6-58) reprezintă <u>legea lui Ohm pentru o porţiune de circuit constituită dintr-un generator</u> (de t.e.m. $\mathcal{E}$ şi rezistenţă interioară R_o) , <u>sub formă integrală</u>.

6.6.4.1.2. <u>Energia furnizată de un generator</u>. a. Interpretînd legea lui Ohm scrisă sub forma $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ din punct de vedere energetic, s-a găsit că în cazul unui conductor pasiv energia electrostatică a purtătorilor de sarcină se transformă în căldură prin efect Joule (6-34):

$$P = \vec{E}_s \cdot \vec{i} = \frac{i^2}{\sigma}$$

Cînd porţiunea de circuit este constituită dintr-un generator, legea lui Ohm (6-51,care se poate scrie şi sub forma

$$G\vec{E}_m = \vec{i} - G\vec{E}_s \quad ,$$

conduce la relaţia:

$$\vec{E}_m.\vec{i} = \frac{i^2}{G} - \vec{E}_s.\vec{i} \quad , \qquad (6\text{-}59)$$

după ce a fost multiplicată scalar cu vectorul $\vec{i}$.

Termenul $-\vec{E}_s.\vec{i}$ este pozitiv, pentru că cei doi vectori au sensuri opuse.

Deci energia furnizată local de generator, dar raportată la unitatee de volum, se transformă în căldură prin efect Joule numai parţial, restul servind la creşterea energiei electrostatice a purtătorilor de sarcină. Această energie la rîndul ei, se transformă în căldură integral, în afara generatorului, dacă restul circuitului este constituit dintr-o rezistenţă pasivă.

b. Considerăm acum, nu o porţiune de circuit, ci un circuit închis, constituit dintr-un generator şi o rezistenţă pasivă. Lucrul forţelor electrice $\vec{F}_e$ şi $\vec{F}_m$ efectuat cînd un purtător de sarcină parcurge întregul circuit, are ca expresie:

$$\mathcal{L} = \oint q(\vec{E}_s + \vec{E}_m)\, d\vec{\ell} \quad , \qquad (6\text{-}60)$$

$d\vec{\ell}$ avînd sensul curentului.

Cum $\oint \vec{E}_s d\vec{\ell} = 0$ şi pentru că $\vec{E}_m$ există numai în interiorul generatorului (6-55), relaţia (6-60) devine:

$$\mathcal{L} = q\oint \vec{E}_m d\vec{\ell} = q\int_B^A \vec{E}_m d\vec{\ell} = q\mathcal{E} \qquad (6\text{-}61)$$

Deoarece forţa $\vec{F}_m = q\vec{E}_m$ este direct opusă forţei de frecare, lucrul $\mathcal{L}$ se transformă integral în căldură.

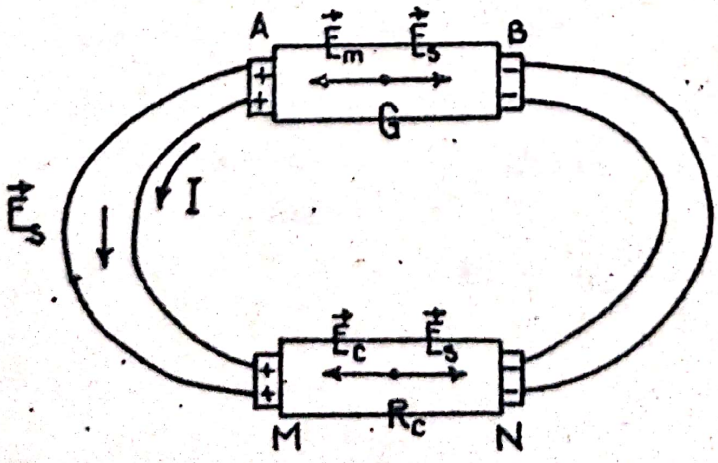
Dacă generatorul este parcurs în timpul dt de o sarcină electrică dQ puterea furnizată de generator are expresia:

$$P = \mathcal{E}\frac{dQ}{dt} = \mathcal{E}I \qquad (6\text{-}62)$$

Din relaţia de mai sus reiese că tensiunea e.m., $\mathcal{E}$, caracterizează generatorul şi din punct de vedere energetic, fiind numeric egală cu puterea disipată de acesta cînd este traversat de un curent cu intensitatea de un amper.

6.6.4.2. Porţiune de circuit constituită dintr-un receptor. Intr-un generator, cîmpul electromotor $\vec{E}_m$ şi vectorul densitate de curent $\vec{i}$ au acelaşi sens; produsul dintre cei doi vectori fiind mai mare de zero, $\vec{E}_m.\vec{i} > 0$, generatorul furnizează energie electrică.

Unele dispozitive care se pot comporta ca generatori, fiind traversate de curent electric, absorb energia electrică. In acest caz, se poate admite că în interiorul acestui dispozitiv există, - ca şi atunci cînd funcţiona ca generator - , un cîmp electromotor, dar care este de sens contrar cu vectorul $\vec{i}$, pentru ca produsul dintre cei doi vectori să fie negativ, $\vec{E}_m.\vec{i} < 0$, şi să absoarbă energie (fig. 6-16). Orice dispozitiv care



transformă energia electrică în alt fel de energie (chimică, mecanică ...) decît în energia calorică se numeşte <u>receptor</u> (RC). Acesta este caracterizat, în primul rînd, de ceea ce este analogul t.e.m., dar care în acest caz se numeşte tensiune <u>contraelectromotoare</u> (t.c.e.m.), deoarece se opune trecerii curentului prin circuit. Cîmpul electromotor care caracterizează de asemenea receptorul s-a notat cu $\vec{E}_c$, întrucît uneori se numeşte <u>cîmp contra-electromotor</u>. In cazul receptorilor $\vec{E}_c < \vec{E}_s$ şi curentul îşi păstrează sensul determinat de generator în circuitul exterior acestuia.

Ca orice dispozitiv electric, deci şi ca generatorii , un receptor este caracterizat şi de <u>rezistenţa sa interioară</u> R'_0. Datorită acestei rezistenţe proprii, nu întreaga energie absorbită se transformă în altă energie decît în calorică; o parte din aceasta se transformă în căldură prin efectul Joule, după cum se constată şi experimental.

In receptor, curentul electric fiind datorat cîmpului electric $\vec{E}_c + \vec{E}_s$, se poate scrie, —la fel ca în paragraful precedent — ,

$$R'_0 I = \int_M^N (\vec{E}_s + \vec{E}_c) d\vec{\ell} = V_M - V_N + \int_M^N \vec{E}_c d\vec{\ell}$$

Deoarece $\vec{E}_c$ care este pozitiv are sens opus lui $d\vec{\ell}$ şi integrarea se face tot în sensul curentului, iar $V_M > V_N$,

$$\int_M^N \vec{E}_c . d\vec{\ell} = -\int_M^N E_c . d\ell = -\mathcal{E}' ;$$

$\mathcal{E}'$ este tensiunea contraelectromotoare a receptorului şi are

o formulă de definiţie asemenea cu cea a t.e.m. :

$$\mathcal{E}' = \int_N^M \vec{E}_c \cdot d\vec{\ell} = \int_M^N E_c \cdot d\ell \qquad (6\text{-}63)$$

T.c.e.m. este egală cu circulaţia lui $\vec{E}_c$ de-a lungul unei linii de cîmp care pleacă de la polul negativ N al receptorului şi ajunge la polul pozitiv M .

Din cele de mai sus rezultă că:

$$R_0' I = V_M - V_N - \mathcal{E}' \quad ,$$

sau

$$\boxed{V_M - V_N = R_0' I + \mathcal{E}'} \qquad (6\text{-}64)$$

Relaţia (6-64) reprezintă legea lui Ohm, sub formă integrală, pentru o porţiune de circuit constituită dintr-un receptor.

Ţinînd seama de faptul că într-un receptor curentul electric are sensul descreşterii potenţialului, dacă se multiplică relaţia (6-64) cu $I.dt$, se obţine:

$$(V_M - V_N) I\, dt = R_0' I^2 dt + \mathcal{E}' I\, dt \qquad (6\text{-}65)$$

Ecuaţia de mai sus arată că energia furnizată receptorului de către un generator care determină la bornele acestuia diferenţa de potenţial $V_M - V_N$ şi-l face să fie parcurs de curentul de intensitate I , se transformă parţial în căldură prin efect Joule şi în altă formă de energie pe care o cedează în exterior, datorită cîmpului contraelectromotor.

Cînd porţiunea de circuit este constituită dintr-o re-

zistenţă pasivă R , relaţia (6-65) se reduce la expresia cunoscută:

$$(V_A - V_B)I\,dt = RI^2dt \quad , \qquad (6\text{-}66)$$

unde $V_A > V_B$ şi I are sensul descreşterii potenţialului.

6.6.4.3. Legea lui Ohm pentru o porţiune oarecare de circuit

a. Dacă o porţiune de circuit face parte dintr-un circuit liniar (fig. 6-16) (fără ramificaţii) şi este parcursă de un curent de intensitate I datorită generatorului de t.e.m. $\mathcal{E}$, de pe circuit, în funcţie de componenţa porţiunii de circuit, sînt valabile relaţiile (6-20; 6-58; 6-64):

$$V_A - V_B = RI \; ; \; V_A - V_B = \mathcal{E} - R_o I \; ; \; V_A - V_B = \mathcal{E}' + R'_o I, \quad (6\text{-}67)$$

unde $V_A > V_B$, iar I are sensul de la A la B în exteriorul generatorului şi de la B la A în interiorul acestuia.

In aceleaşi condiţii, dacă porţiunea de circuit conţine un generator şi o rezistenţă pasivă R , sau un receptor şi o rezistenţă pasivă, se pot scrie relaţiile:

$$V_A - V_B = \mathcal{E} - (R_o + R)I \quad \text{şi} \quad V_A - V_B = \mathcal{E}' + (R'_o + R)I \quad (6\text{-}68)$$

b. Să presupunem acum o porţiune de circuit cuprinzînd un generator de t.e.m. $\mathcal{E}$, un receptor de t.c.e.m. $\mathcal{E}'$ şi o rezistenţă pasivă R_p - , parcursă de un curent de intensitate I de la A spre B , $(V_A > V_B)$ - , dar care să facă parte dintr-un circuit oarecare (o ramură - AB - dintr-o reţea electrică) (fig. 6-17). In schema din fig. 6-17 s-au prezentat şi simbolurile prin care se reprezintă un generator, un receptor şi o rezistenţă pasivă.

zistenţă pasivă R , relaţia (6-65) se reduce la expresia cunoscută:

$$(V_A - V_B)I\,dt = RI^2dt \quad , \qquad (6\text{-}66)$$

unde $V_A > V_B$ şi I are sensul descreşterii potenţialului.

6.6.4.3. Legea lui Ohm pentru o porţiune oarecare de circuit

a. Dacă o porţiune de circuit face parte dintr-un circuit liniar (fig. 6-16) (fără ramificaţii) şi este parcursă de un curent de intensitate I datorită generatorului de t.e.m. $\mathcal{E}$, de pe circuit, în funcţie de componenţa porţiunii de circuit, sînt valabile relaţiile (6-20; 6-58; 6-64):

$$V_A - V_B = RI \; ; \; V_A - V_B = \mathcal{E} - R_o I \; ; \; V_A - V_B = \mathcal{E}' + R_o' I, \quad (6\text{-}67)$$

unde $V_A > V_B$, iar I are sensul de la A la B în exteriorul generatorului şi de la B la A în interiorul acestuia.

In aceleaşi condiţii, dacă porţiunea de circuit conţine un generator şi o rezistenţă pasivă R , sau un receptor şi o rezistenţă pasivă, se pot scrie relaţiile:

$$V_A - V_B = \mathcal{E} - (R_o + R)I \quad \text{şi} \quad V_A - V_B = \mathcal{E}' + (R_o' + R)I \quad (6\text{-}68)$$

b. Să presupunem acum o porţiune de circuit cuprinzînd un generator de t.e.m. $\mathcal{E}$, un receptor de t.c.e.m. $\mathcal{E}'$ şi o rezistenţă pasivă R_p - , parcursă de un curent de intensitate I de la A spre B , $(V_A > V_B)$ - , dar care să facă parte dintr-un circuit oarecare (o ramură - AB - dintr-o reţea electrică) (fig. 6-17). In schema din fig. 6-17 s-au prezentat şi simbolurile prin care se reprezintă un generator, un receptor şi o rezistenţă pasivă.

Puterea primită de porţiunea de circuit AB este furnizată de curentul care îl parcurge şi de generatorul $\mathcal{E}$, R_o; aceasta este consumată de receptor, care o transformă într-o altă formă de energie decît calorică şi de rezistenţa pasivă $R = R_o + R'_o + R_p$ care o transformă în căldură prin efect Joule. Cele de mai sus se pot exprima prin relaţia:

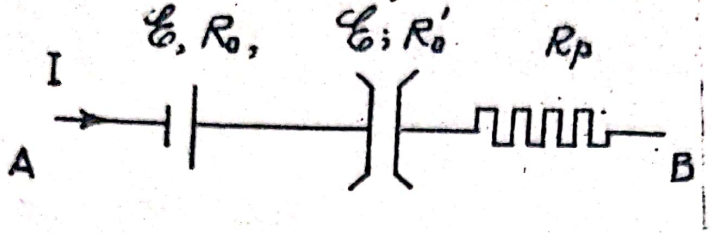


Fig. 6-17

$$(V_A - V_B)I + \mathcal{E}I = \mathcal{E}'I + RI^2 \quad ,$$

de unde

$$V_A - V_B = RI - \mathcal{E} + \mathcal{E}' \qquad (6\text{-}69)$$

Prin generalizare, dacă porţiunea de circuit cuprinde un număr oarecare de generatori, receptori şi rezistenţe pasive, făcînd convenţia ca t.e.m. să fie afectate de semnul + şi t.c.e.m. de semnul - , condiţiile anterior precizate fiind aceleaşi, se poate scrie:

$$V_A - V_B = \sum RI - \sum \mathcal{E} \; ; \qquad (6\text{-}70)$$

diferenţa de potenţial de la capetele unei porţiuni oarecare de circuit parcurs de un curent electric în sensul potenţialelor descrescătoare, este pozitivă şi egală cu diferenţa dintre suma căderilor ohmice de tensiune şi suma algebrică a tensiunilor electromotoare şi contralectromotoare.

Aceasta este <u>legea lui Ohm sub forma cea mai generală, referitoare la o porţiune de circuit</u>.

Dacă sensul de parcurs nu se precizează, notînd diferenţa de potenţial $V_A - V_B = V$, legea de mai sus se scrie:

$$\boxed{V = \sum RI - \sum \mathcal{E}} \qquad (6\text{-}71)$$

şi se aplică ţinînd seama de o serie de convenţii. V este pozitiv dacă punctul iniţial al parcusrului este la potenţialul cel mai înalt, produsul RI este pozitiv cînd sensul lui I coincide cu acela al parcursului iar $\mathcal{E}$ şi $\mathcal{E}'$ se consideră pozitive dacă urmînd sensul de parcurs se iese prin polul pozitiv; în caz contrar, V, RI şi $\mathcal{E}$ (ca şi $\mathcal{E}'$) se consideră negative.

Observaţie. Legea lui Ohm scrisă sub forma (6-71) şi aplicată cu convenţiile precizate, conduce la toate celelalte forme sub care s-a scris mai înainte. De exemplu, dacă se consideră cazul unei porţiuni de circuit constituite dintr-un generator care alimentează întregul circuit fără ramificaţii (fig. 6-16) şi se alege sensul de parcurs de la polul pozitiv la polul negativ, care este de sens contrar cu acela al curentului, se va scrie:

$$V = -R_0 I - (-\mathcal{E}) = \mathcal{E} - R_0 I$$

In aceleaşi condiţii, pentru o porţiune de circuit conţinînd un receptor, relaţia (6-71) ne dă:

$$V = R_0' I - (-\mathcal{E}') = R_0' I + \mathcal{E}'$$

deoarece, menţinînd sensul de parcurs de la polul pozitiv la polul negativ, acesta coincide cu sensul curentului (fig. 6-16).

6.6.5. Legea lui Ohm pentru un circuit în ansamblu

6.6.5.1. Circuit constituit dintr-un generator şi rezistenţe pasive (fig. 6-18). Pentru porţiunea de circuit conţinînd generatorul de t.e.m. $\mathcal{E}$ şi rezistenţă interioară R_o, se poate scrie (6-58):

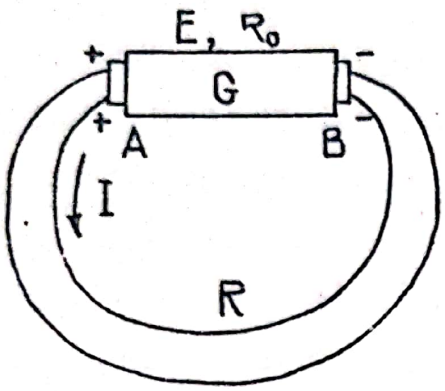


Fig. 6-18

$$V_A - V_B = \mathcal{E} - R_o I$$

Considerînd că în porţiunea de circuit exterioară generatorului, suma rezistenţelor pasive este egală cu R, căderea de tensiune între punctele A şi B are ca expresie:

$$V_A - V_B = RI$$

Din egalităţile de mai sus rezultă:

$$\boxed{\mathcal{E} = (R_o + R)I} \qquad (6\text{-}72)$$

expresie care reprezintă legea lui Ohm pentru un circuit liniar închis, conţinînd un singur generator şi rezistenţe pasive.

6.6.5.2. Circuit liniar conţinînd un generator, un receptor şi rezistenţe pasive (fig. 6-19). Pe de o parte, algebric, se poate scrie pentru porţiunea de circuit conţinînd generatorul:

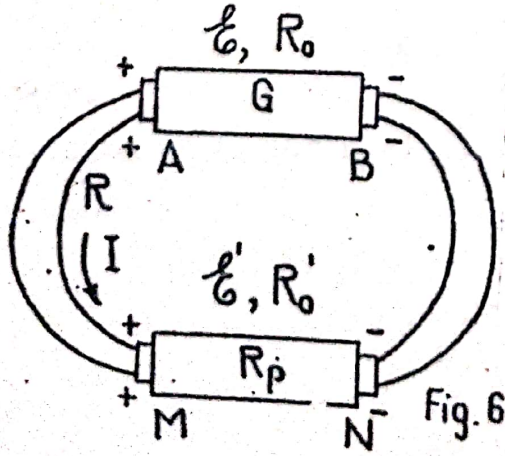


Fig. 6-19

$$(V_A - V_B)_{int} = \mathcal{E} - R_o I$$

Curba $V_A - V_B = f(I)$ se numeşte <u>caracteristica externă a generatorului</u> şi caracterizează comportarea acestuia faţă de porţiunea de cirucit exterioară , cînd t.e.m. $\mathscr{E}$ nu depinde de intensitatea curentului. Pe de altă parte, pentru porţiunea de circuit exterioară acestuia, se poate scrie:

$$V_A - V_B = RI + (V_M - V_N)$$

Insă

$$V_M - V_N = \mathscr{E}' + R_o'I \quad ,$$

după cum s-a arătat (6-64); deci

$$(V_A - V_B)_{ext} = \mathscr{E}' + (R_o' + R)I$$

Curba care reprezintă ecuaţia de mai sus, corespunzătoare porţiunii de circuit exterioară generatorului se numeşte <u>caracteristica de tensiune</u>.

Egalitatea

$$\mathscr{E} - R_oI = \mathscr{E}' + (R_o' + R)I \quad , \qquad (6\text{-}73)$$

care se mai poate scrie sub forma:

$$\mathscr{E} - \mathscr{E}' = (R + R_o + R_o')I \qquad (6\text{-}74)$$

caracterizează regimul circuitului.

Grafic, acest regim este reprezentat de punctul de intersecţie al caracteristicii de tensiune cu caracteristica externă (fig. 6-20).

Fig. 6-20 ca şi relaţia (6-74) arată că intensitatea curentului de pe circuit este determinată de diferenţa dintre t.e.m. $\mathscr{E}$ şi t.c.e.m. $\mathscr{E}'$; cînd $\mathscr{E}'$ devine mai mare decît $\mathscr{E}$, atunci rolurile generatorului şi receptorului se inversează şi sensul curentului se schimbă. In acest fel apare evident de ce

Curba $V_A - V_B = f(I)$ se numeşte <u>caracteristica externă a generatorului</u> şi caracterizează comportarea acestuia faţă de porţiunea de cirucit exterioară , cînd t.e.m. $\mathscr{E}$ nu depinde de intensitatea curentului. Pe de altă parte, pentru porţiunea de circuit exterioară acestuia, se poate scrie:

$$V_A - V_B = RI + (V_M - V_N)$$

Insă

$$V_M - V_N = \mathscr{E}' + R_o'I \quad ,$$

după cum s-a arătat (6-64); deci

$$(V_A - V_B)_{ext} = \mathscr{E}' + (R_o' + R)I$$

Curba care reprezintă ecuaţia de mai sus, corespunzătoare porţiunii de circuit exterioară generatorului se numeşte <u>caracteristica de tensiune</u>.

Egalitatea

$$\mathscr{E} - R_oI = \mathscr{E}' + (R_o' + R)I \quad , \qquad (6-73)$$

care se mai poate scrie sub forma:

$$\mathscr{E} - \mathscr{E}' = (R + R_o + R_o')I \qquad (6-74)$$

caracterizează regimul circuitului.

Grafic, acest regim este reprezentat de punctul de insecţie al caracteristicii de tensiune cu caracteristica externă (fig. 6-20).

Fig. 6-20 ca şi relaţia (6-74) arată că intensitatea curentului de pe circuit este determinată de diferenţa dintre t.e.m. $\mathscr{E}$ şi t.c.e.m. $\mathscr{E}'$; cînd $\mathscr{E}'$ devine mai mare decît $\mathscr{E}$, atunci rolurile generatorului şi receptorului se inversează şi sensul curentului se schimbă. In acest fel apare evident de ce

t.c.e.m. se ia algebric cu semn opus faţă de t.e.m.

Variaţia potenţialului într-un asemenea circuit, con-

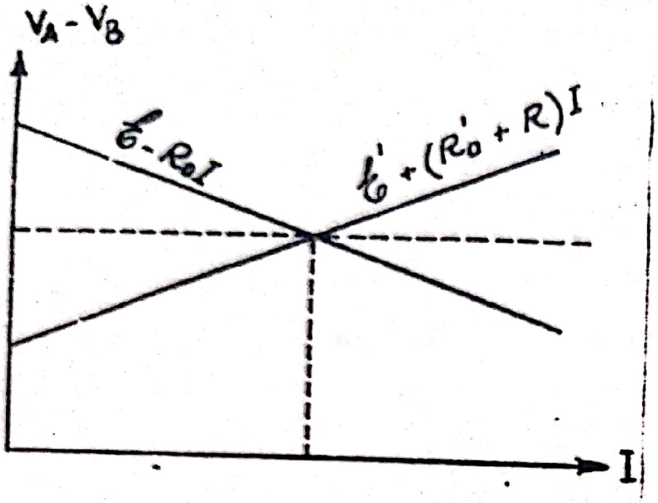


Fig. 6-20

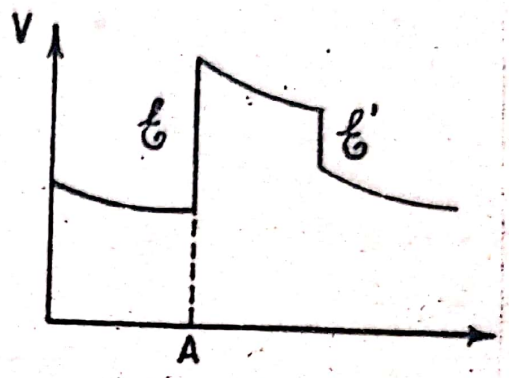


Fig. 6-21

siderînd că $R_0 = R_0' = 0$, se poate reprezenta schematic ca în fig. 6-21. In generator, potenţialul urcă brusc, în receptor scade brusc şi scade progresiv în restul circuitului constituit din rezistenţe pasive.

Observaţie. Dacă circuitul nu conţine un receptor, în cazul cînd $R \gg R_0$, $\mathcal{E}$ nu variază sensibil cu R şi se poate considera că tensiunea la bornele generatorului rămîne constantă (generator de tensiune constantă). Cînd $R \to \infty$ (circuitul este deschis), se vorbeşte despre un regim în gol; atunci tensiunea la bornele generatorului este egală cu t.e.m. a acestuia.

Dacă $R_0 \gg R$, adică se leagă bornele generatorului cu un conductor de rezistenţă practic nulă, se realizează un scurt circuit şi se vorbeşte despre un regim în scurt circuit. In acest caz, curentul care circulă prin circuit este egal cu $\frac{E}{R_0}$ şi se zice că avem un generator de curent constant.

6.6.5.3. Circuit liniar constituit din generatori, receptori şi rezistenţe pasive. Dacă un circuit fără ramificaţii

conţine generatori de t.e.m. $\mathscr{E}_1$, $\mathscr{E}_2$, ... şi de rezistenţe interioare R_{o1}, R_{o2} , ... , receptori t.c.e.m. $\mathscr{E}'_1$, $\mathscr{E}'_2$, ... şi de rezistenţe interioare R'_{o1} , R'_{o2} , ... şi rezistenţe pasive R_1 , R_2 , ... , înseriate într-o ordine oarecare, dacă se ţine seama de cele cuprinse în paragrafele precedente, se poate scrie aritmetic:

$$\mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + \ldots - \mathscr{E}'_1 - \mathscr{E}'_2 \ldots = I(R_{o1} + R_{o2} + \ldots + R'_{o1} + R'_{o2} + \ldots R_1 + R_2 + \ldots) \quad , \qquad (6\text{-}75)$$

sau

$$\sum \mathscr{E} - \sum \mathscr{E} = I \sum R \qquad (6\text{-}76)$$

Aceeaşi relaţie, se scrie algebric:

$$\boxed{\sum \mathscr{E} = \sum RI} \quad , \qquad (6\text{-}77)$$

în care $\sum \mathscr{E}$ reprezintă suma t.e.m. afectate de semnul plus şi t.c.e.m. afectate de semnul minus, - convenţional - , iar $\sum R$ reprezintă rezistenţa totală a circuitului. In acest fel s-a considerat că efectele electromotor şi contraelectromotor sînt reversibile.

Deci legea lui Ohm, după care se poate calcula intensitatea curentului într-un circuit liniar (fără ramificaţii) conţinînd generatori, receptori şi rezistenţe pasive, spune că în acest caz suma algebrică a tensiunilor electromotoare şi a tensiunilor contraelectromotoare este egală cu suma căderilor de tensiune de pe circuit.

Observaţie. La aceeaşi expresie a legii lui Ohm se putea ajunge dacă se pleca de la relaţia (6-70), în care se con-

sidera $V_B = V_A$; de asemenea, expresia (6-77) aplicată la o porţiune de circuit, conduce la relaţia (6-71).

Observaţie. Legea lui Ohm scrisă sub toate formele expuse, se verifică în realitate; se poate deduce din aceasta că ipotezele de la care s-a plecat corespund realităţii.

6.6.6. Exemple de generatori şi receptori

6.6.6.1. Generatori. Aceştia sînt caracterizaţi prin cîmpul electromotor şi prin t.e.m., - indiferent pe baza cărora fenomene sînt construiţi - , şi produc curenţi electrici.

Astfel, generatorii electromagnetici (de inducţie), cum sînt dinamul şi alternatorul, - care permit să se facă conversiunea directă a energiei mecanice în energie electrică - , sînt sediul unei t.e.m. de inducţie, Cîmpul electromotor (de inducţie), - care face să se deplaseze electronii - , ia naştere în urma deplasării unor conducţori în cîmp magnetic.

Generatorii chimici cum sînt pilele chimice (elementele galvanice) şi acumulatorii, - care fac posibilă conversiunea directă a energiei chimice în energie electrică - , se bazează pe existenţa unui cîmp electromotor de origine chimică, acesta apare în urma faptului că curentul electric care străbate generatorul provoacă reacţii chimice de unde provine energia necesară.

In cazul generatorilor termoelectrici, cum sînt pilele termoelectrice (termoelementele), - care realizează conversiunea directă a energiei termice în energie electrică - , cîmpul electromotor se datorează faptului că un lanţ heterogen de conductori se află la o temperatură heterogenă.

Alte tipuri de generatori, la fel cu cei enumeraţi mai înainte, se bazează tot pe existenţa unui cîmp electromotor,

dar care este creat de alte fenomene. Maşina Van de Graaff realizează conversiunea directă a energiei mecanice în energie electrică.

Generatorii magnetohidrodinamici (MHD) transformă direct energia calorică în energie electrică. De asemenea, pilele de conbustie (9.2.2.) ca şi pilele termoionice transformă direct energia termică în energie electrică. Generatorii fotoelectrici cum sînt pilele fotoelectrice (fotopile) transformă direct energia radiantă în energie electrică.

6.6.6.2 Receptorii, în majoritatea cazurilor, pot fi caracterizaţi prin cîmpul contraelectromotor.

In cazul unui motor, care are o constituţie asemănătoare cu aceea a unui generator electromagnetic (dinamo), în partea componentă a acestuia care se roteşte cînd maşina este traversată de curent, apare o t.e.m. de inducţie, care se opune trecerii curentului şi care, - din acest motiv - , se numeşte t.c.e.m.;datorită existenţei acestei t.c.e.m., energia electrică se transformă în energie mecanică.

O pilă chimică, - la fel ca un acumulator - , cînd este traversată de un curent electric în sens invers ca atunci cînd funcţionează ca generator, transformă energia electrică în energie chimică; t.c.e.motoare este de aceeaşi natură ca şi t.e. motoare a pilei, sau acumulatorului.

Observaţii. 1. Unele maşini electrice (dinamo, motorul de c.c. ca şi pilele chimice sau acumulatorii pot funcţiona ca generatori, - atunci curentul care le parcurge iese prin borna pozitivă a acestuia - , sau ca receptor, - atunci curentul care-l străbate iese prin borna negativă; asemenea generatori se numesc adesea aparate polarizate sau generatori polarisati .

Cînd t.e.m. este aproximativ egală cu t.c.e.m., acestea poartă denumirea de aparate polarizate reversibile (pila Daniell).

2. Un electrolizor, în cazul cînd în urma proceselor care au loc în timpul electrolizei, cei doi electrozi, - iniţial identici - (doi electrozi de Pt şi soluţie de H_2SO_4) se polarizează, funcţionează ca un receptor polarizat, aşa cum se petrec fenomenele şi în alte cazuri deja descrise, Electrolizorul a devenit o pilă a cărui t.e.m. se opune să fie traversată de curent; aceasta este de fapt t.c.e.m. a electrolizorului.

In cazul unui electrolizor cu anod solubil (doi electrozi de Cu şi o soluţie de SO_4Cu), electrozii nu se polarizează; este vorba de un receptor nepolarizat. Acesta se comportă ca o rezistenţă pasivă, întrucît nu au loc reacţii chimice, ci numai un transport de cupru de la un electrod la altul, indiferent de sensul curentului.

CAPITOLUL 7. REȚELE DE CONDUCTORI

7.1. Definiții

Un circuit electric este un ansamblu de elemente active - generatorii de curent (pile, acumulatori, dinamo etc.) și elemente pasive; acestea din urmă se comportă în diverse moduri : rezistențele disipă energia electrică sub formă de căldură; condensatorii, autoinductanțele și inductanțele mutuale înmagazinează energia electrică sub diverse forme, iar receptorii (motoare, celule electrolitice etc. ...) transformă această energie în altă formă de energie (mecanică, chimică).

Cînd elementele care constituie circuitul electric sînt legate numai în serie, se spune că avem un circuit serie sau un circuit liniar.

In cazul cînd un circuit electric este constituit dintr-un ansamblu de elemente asociate într-un mod oarecare, acesta poartă obișnuit numele de rețea de conductori (fig. 7-1).

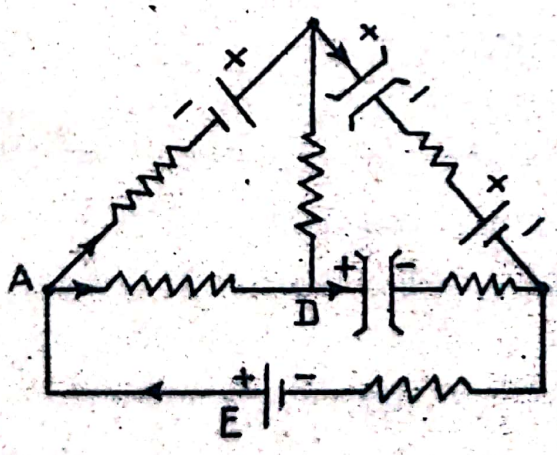


Fig. 7.-1

Punctul de joncțiune a cel puțin trei conductori se numește nod. O porțiune de circuit constituită din diverse elemente cuprinsă între două noduri (AB, etc.) se numește ramură. Un ansamblu de

ramuri, constituit astfel încît două ramuri succesive au totdeauna un nod comun şi formează un circuit (contur) închis se numeşte ochi de reţea. Dacă se parcurge circuitul (conturul) într-un sens oarecare, fiecare ramură este traversată o singură dată (ABDA, ABCDA, ACEA etc.).

O reţea de conductori se studiază considerînd că aceasta este sediul unui regim permanent, care este caracterizat prin aceea că intensitatea curentului care circulă prin fiecare ramură are valoare constantă şi bine determinată ca şi potenţialul fiecărui punct din reţea.

A studia o reţea de conductori înseamnă a determina , prin calcul, intensitatea şi sensul curentului din fiecare ramură a reţelei şi d.d. potenţial dintre două puncte oarecare ale acesteia, cunoscînd elementele componente, dacă sînt îndeplinite condiţiile ca regimul de curent să fie permanent (staţionar) şi că rezistenţele şi t.e.m. ca şi t.c.e.m. din reţea să fie constante (independente de intensitatea curentului).

7.2. Legile lui Kirchhoff

7.2.1. Enunţul legilor

7.2.1.1. Precizări. Pentru a enunţa legile lui Kirchhoff (1848), se presupune că se cunosc deja valorile şi sensurile curenţilor din reţea. Se alege un sens de parcurs al ochiurilor şi se convine ca să se ia cu semnul plus curentul al cărui sens, - ales arbitrar - , coincide cu sensul de parcurs (fig. 7-2). T.e.m. a unui generator, - a cărui polaritate nu depinde de sensul curentului care îl parcurge- , se ia cu semnul plus dacă, parcurgînd ochiul în sensul de parcurs se iese prin polul pozitiv al acestuia (regula este valabilă dacă

legea a II-a a lui Kirchhoff se exprimă prin relaţia (7-2). T.e.e.m. a unui receptor se ia cu semnul pozitiv, după aceeaşi convenţie care se acceptă pentru t.e.m., însă polaritatea receptorului depinde de sensul curentului care îl traversează; curentul intră într-un receptor prin polul pozitiv al acestuia. Semnul curentului, al t.e.m. şi al t.c.e.m. este negativ în cazurile contrare celor precizate mai sus.

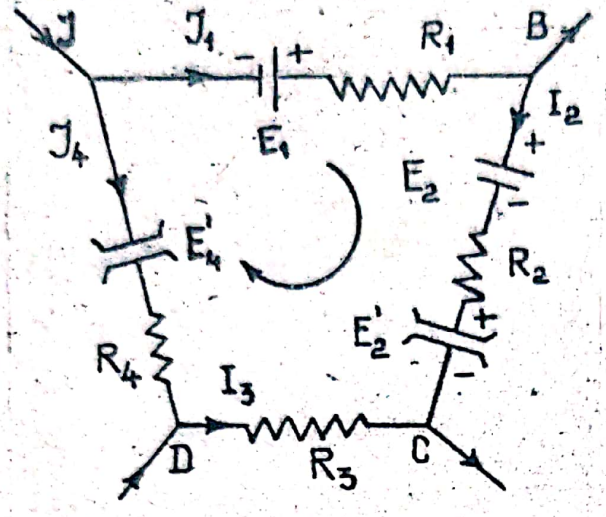


Fig. 7-2

7.2.1.2. Legea nodurilor. Suma intensităţilor curenţilor care ajung la un nod este egală cu suma intensităţilor curenţilor care pleacă de la acel nod.

Considerînd intensitatea curentului ca o mărime algebrică, expresia matematică a legii de mai sus este:

$$\sum_n (\pm I_n) = 0 \quad , \tag{7-1}$$

dacă se iau cu semnul plus curenţii care vin şi cu semnul minus curenţii care pleacă. In cazul nodului A din fig. 7-2, se va scrie:

$$I - I_1 - I_4 = 0$$

Această lege exprimă în fond o caracteristică a regimului staţionar stabilit în reţea, după care sarcina electrică în orice punct al acestuia se conservă.

7.2.1.3. Legea ochiurilor. Legea lui Ohm generalizată pentru o porţiune oarecare dintr-un circuit, conţinînd rezistenţe, generatori şi receptori, s-a exprimat prin relaţia (6-70):

$$V_A - V_B = \sum RI - \sum E$$

Aplicînd această lege la toate ramurile care alcătuiesc un ochi, se constată că se revine la potenţialul de la care s-a plecat; adică membrul stîng al relaţiei de mai sus devine zero. In acest fel, se ajunge la legea a doua a lui Kirchhoff:

$$\boxed{\sum_n (\pm R_n I_n) = \sum_n (\pm E_n)} \quad ; \qquad (7\text{-}2)$$

suma tuturor căderilor de tensiune care are loc în ramurile unui ochi, este egală cu suma t.e.m. şi t.c.e.m, care acţionează în ramurile acelui ochi. Semnul care afectează fiecare termen al sumelor de mai sus se găseşte respectînd convenţiile precizate în (7.2.1.1.), care coincid cu cele referitoare la legea lui Ohm generalizată (6.6.4.3).

Astfel, referitor la ochiul din fig. 7-2 se va scrie:

$$V_A - V_B = R_1 I_1 + E_1$$
$$V_B - V_C = R_2 I_2 + E_2 + E_2'$$
$$V_C - V_D = - R_3 I_3$$
$$V_D - V_A = - R_4 I_4 - E_4'$$

$$0 = R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 - E_1 + E_2 + E_2' - E_4' \quad ;$$

sau după (7-2)

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 = E_1 - E_2 - E_2' + E_4'$$

7.2.2. Modul de aplicare a legilor lui Kirchhoff Dacă din punct de vedere al sensului fizic legile lui Kirchhoff nu aduc nimic nou, - prima lege aminteşte că regimul stabilit în reţea este staţionar, iar a doua că, parcurgînd un contur închis într-o reţea, se revine la potenţialul de la care s-a plecat -, acestea au o importanţă deosebită în studiul reţelelor de conductori.

Cele două legi ale lui Kirchoff conduc să se scrie două sisteme de ecuaţii care permit să determine valorile algebrice ale intensităţilor curenţilor din fiecare ramură a reţelei, datorată tuturor t.e.m. şi t.c.e.m. care acţionează. Aceasta, deoarece în final se obţine un singur sistem de ecuaţii care este constituit dintr-un număr de ecuaţii liniare egal cu numărul necunoscutelor.

După ce se aleg sensurile curenţilor în fiecare ramură, folosind toate indicaţiile posibile ca aceste sensuri să coincidă cu sensurile reale ale acestora, se scriu cele două sisteme de ecuaţii.

Primul sistem de ecuaţii se obţine prin aplicarea primei legi. Deoarece în stabilirea regimului reţelei contează de fapt diferenţele de potenţial, - potenţialul unuia dintre noduri putînd fi luat ca reper, - numărul de ecuaţii furnizat de prima lege este egal cu $n-1$, dacă n este numărul total de noduri din reţea. In cazul reţelei a cărei schemă se vede în fig. 7-3 există patru noduri; primul sistem de ecuaţii se va scrie

$$\left.\begin{aligned} &(A) \quad I = I_1 + I_4 \\ &(B) \quad I_1 = I_2 + I_g \\ &(D) \quad I_4 = I_3 - I_g \end{aligned}\right\} \quad I \qquad (7\text{-}3)$$

De aici rezultă că

$$I_4 = I - I_1 \quad , \quad I_g = I_1 - I_2 \quad \text{şi}$$
$$I_3 = I - I_2$$

Din cele şase necunoscute au rămas numai trei.

Numărul total al necunoscutelor este egal cu numărul ramurilor (laturilor) care constituie reţeaua (curenţii care le parcurg). Dacă numărul acestora este ℓ, atunci mai este necesar un sistem de ecuaţii care să cuprindă ℓ -(n-1) ecuaţii.

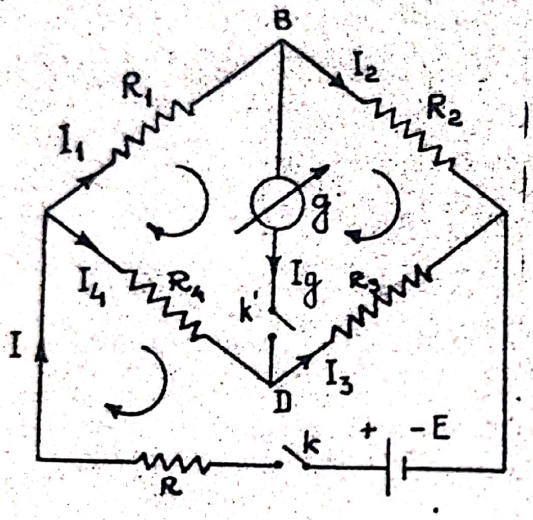


Fig. 7-3

Acest al doilea sistem de ecuaţii se obţine prin aplicarea legii a doua a lui Kirchhoff. Această lege, aplicată la toate ochiurile reţelei, conduce la un sistem de ecuaţii care conţine mai multe ecuaţii necunoscute (ℓ - n + 1) ; se constată însă că aceste ecuaţii nu sînt liniar independente. Referindu-ne la aceeaşi schemă din fig. 7-3, se poate scrie:

$$\left.\begin{array}{ll} (ABDA) & R_1I_1 + gI_g - R_4I_4 = 0 \\ (BCDB) & R_2I_2 - R_3I_3 - gI_g = 0 \\ (ADCEA) & R_4I_4 + R_3I_3 + RI = E \end{array}\right\} \quad II \qquad (7-4)$$

Ochiurile de felul celor trei luate în considerare se numesc <u>ochiuri independente</u>; acestea conţin fiecare cîte o ramură pe care nu o conţine un alt ochi şi totodată cuprind, în ansamblu,

toate ramurile reţelei. Numărul acestor ochiuri p corespunde exact cu numărul de ecuaţii care trebuie să constituie al doilea sistem, pentru ca curenţii să fie determinaţi. $\ell-(n-1) = p$ (teorema lui Euler).

In cazul exemplului la care ne-am referit (fig. 7-3), numărul de ecuaţii al sistemului II (7-4) corespunde cu numărul de necunoscute care au mai rămas după aplicarea primei legi, în număr de trei.

Aplicarea legii a II-a şi la ochiurile ABCDA, ABCBA, conduce la ecuaţii care nu aduc nimic nou, întrucît cuprind termeni referitori la ramuri de care s-a ţinut deja seama.

Rezolvarea ecuaţiilor obţinute prin aplicarea legilor lui Kirchhoff conduce la o soluţie care se interpretează în funcţie de constituţia reţelei.

Cînd reţeaua conţine numai rezistenţe pasive şi aparate polarizate, interpretarea este simplă. Dacă toate valorile curenţilor care se obţin din calcule sînt pozitive, înseamnă că sensurile alese pentru toţi curenţii corespund realităţii. O valoarea negativă $-I_k$ obţinută pentru curentul din ramura k, spune numai că sensul, arbitrar ales, al curentului în acea ramură trebuie schimbat pentru a corespunde celui real. Faptul că sensurile atribuite a priori unora dintre curenţi nu corespund cu cele reale, nu modifică cu nimic valorile curenţilor care rezultă din rezolvarea sistemului de ecuaţii obţinut în urma aplicării legilor lui Kirchhoff, întrucît semnele t.e.m. sînt bine precizate şi nu depind de sensurile alese ale curenţilor ci numai de sensul de parcurs (fig. 7-3).

Dacă reţeaua conţine şi receptori (motori, voltametre) şi se obţin valori pozitive pentru toţi curenţii din reţea, problema este rezolvată definitiv ca şi în primul caz (cînd reţea-

ua nu conţinea receptori). O valoare negativă a lui I_k ($-I_k$) nu spune numaidecît că I_k este valoarea curentului care circulă prin ramura k şi nici că celelalte valori obţinute pentru curenţii din celelalte ramuri corespund cu realitatea. Aceasta se datorează faptului că t.c.e.m. a unui receptor (veritabil) se opune întotdeauna trecerii curentului, - adică semnul t.c.e.m. este contrar cu acela al curentului care îl parcurge - , Deci cînd se obţine $-I_k$, este necesar să se schimbe sensul arbitrar ales al curentului în ramura k şi apoi să se rezolve noul sistem de ecuaţii. De exemplu, referindu-ne la schema din fig. 7-2, dacă se alege sensul lui I_4 cum se arată în figură, E'_4 are polaritatea precizată pe aceeaşi figură ; dar dacă s-ar fi ales pentru I_4 sensul contrar, atunci trebuia schimbată şi polaritatea receptorului.

In cazul cînd rezolvarea unui sistem de ecuaţii, - obţinut după schimbarea sensului lui I_k - , se obţine tot o valoare negativă pentru I_k ($-I_k$), înseamnă că problema nu poate fi rezolvată decît dacă se iau în considerare unele ipoteze care trebuie justificate în fiecare caz particular. S-ar putea, de exemplu, ca intensitatea curentului prin această ramură, să fie nulă ($I_k = 0$), sau ca receptorul să se manifeste numai ca o rezistenţă pasivă (motor care nu se roteşte).

7.2.3. <u>Puntea Wheatstone</u>.

O instalaţie constituită din patru rezistenţe conectate sub formă de patrulater, o sursă de curent continuu conectată într-una din diagonale şi un indicator de c.c. (galvanometru) plasat în diagonala a doua, poartă numele de <u>punte Wheatstone</u> (fig. 7-3).

Studiul complet al acestei reţele se face rezolvînd sistemele de ecuaţii provenite din aplicarea legilor lui Kirchhoff

(7.2.2).

Această rețea este foarte mult utilizată la măsurarea unei rezistențe necunoscute; în acest caz este vorba despre metoda punții Wheatstone. Pentru a ajunge la relația care face legătura dintre cele trei rezistențe cunoscute care constituie trei din laturile punții și rezistența a patra, necunoscută, care completează patrulaterul, nu este necesar să se studieze puntea în amănunțime.

Dacă se consideră că puntea este echilibrată, adică se presupune că $V_B = V_D$ și deci că prin "puntea" aruncată între punctele B și D nu trece curent ($I_g = 0$), atunci se ajunge foarte ușor la relația dintre cele patru rezistențe.

Referindu-ne la sistemul de ecuații stabilit pentru această rețea (7.2.2), dacă se ține seama că $I_g = 0$, se obține:

$$R_1 I_1 = R_4 I_4$$
$$R_2 I_2 = R_3 R_3$$

Prin satisfacerea condiției $I_g = 0$, rezultă totodată că $I_1 = I_2$ și $I_4 = I_3$. Astfel, sistemul de ecuații de mai sus conduce la relația căutată:

$$\boxed{R_1 R_3 = R_2 R_4} \quad ; \qquad (7-4)$$

produsele în cruce ale rezistențelor patrulaterului unei punți Wheatstone echilibrate sînt egale.

În practică, cele trei rezistențe cunoscute cu o bună precizie (mergînd pînă la eroarea de 10^{-6}) și variabile, sînt realizate cu ajutorul a trei cutii de rezistențe. Dacă $R_4 = R_x$ este rezistența necunoscută, atunci se fixează raportul R_1/R_2 și se variază R_3 pînă cînd puntea este în echilibru; în altă variantă, se poate menține R_3 fix și se variază raportul $\frac{R_1}{R_2}$.

7.3. Metoda curenților ciclici (de ochiuri)

Legile lui Kirchhoff pot fi aplicate astfel la studiul unei rețele încît să nu se folosească legea întîia. Se disting, din rețea, toate ochiurile independente, - fiecare ramură trebuind să intre cel puțin o dată în componența unui ochi - , și se consideră că fiecare ochi este parcurs de un "curent ciclic de ochi"; de această dată, variabilele independente sînt acești curenți ciclici (fig. 7-4).

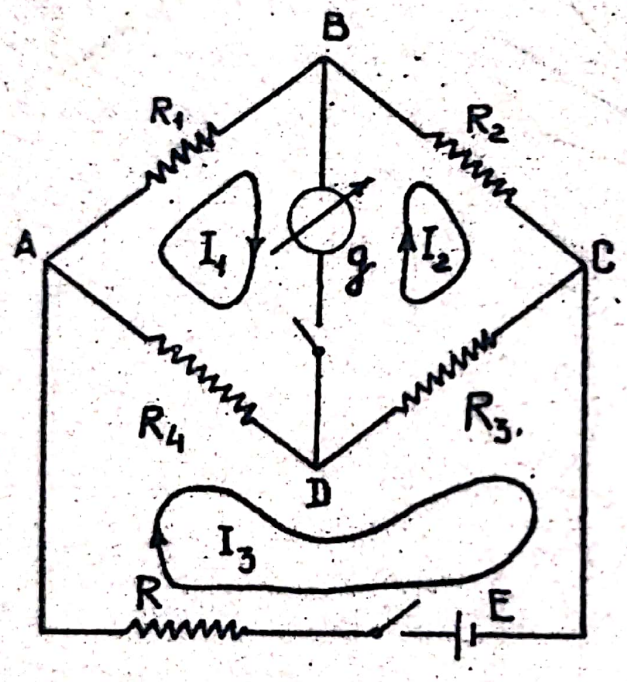


Fig. 7-4

Curentul care parcurge o ramură componentă a unui ochi, este egal cu suma algebrică a curenților ciclici care o străbat.

Dacă rețeaua conține ℓ ramuri și n noduri, se vor obține:

$$p = \ell - (n - 1)$$

ecuații; adică numărul de ecuații care se obține este egal cu acela furnizat de legea a doua a lui Kirchhoff (legea ochiurilor).

Avantajul metodei curenților ciclici (Maxwell) constă deci în aceea că numărul ecuațiilor care alcătuiesc sistemul de rezolvat este mai mic decît cel obținut prin aplicarea ambelor legi ale lui Kirchhoff și prezintă interes în cazul rețelelor cu număr mare de noduri.

Referindu-ne tot la punțea Wheatstone (fig. 7-4), dacă

sens al de parcurs al ochiurilor se alege să fie același ca al curenților ciclici I_1, I_2 și I_3, și curenții de ramură I_k se exprimă în funcție de curenții de ochiuri $\mathcal{I}_k$, se obține:

$$\left.\begin{aligned} R_1\mathcal{I}_1 + g(\mathcal{I}_1 - \mathcal{I}_2) + R_4(\mathcal{I}_1 - \mathcal{I}_3) &= 0 \\ R_2\mathcal{I}_2 + R_3(\mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_3) + g(\mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_1) &= 0 \\ R\mathcal{I}_3 + R_4(\mathcal{I}_3 - \mathcal{I}_1) + R_3(\mathcal{I}_3 - \mathcal{I}_2) &= E \end{aligned}\right\} \qquad (7\text{-}5)$$

sau

$$\left.\begin{aligned} (R_1 + g + R_4)\mathcal{I}_1 - g\mathcal{I}_2 - R_4\mathcal{I}_3 &= 0 \\ -g\mathcal{I}_1 + (R_2 + R_3 + g)\mathcal{I}_2 - R_3\mathcal{I}_3 &= 0 \\ -R_4\mathcal{I}_1 - R_3\mathcal{I}_2 + (R + R_3 + R_4)\mathcal{I}_3 &= E \end{aligned}\right\} \qquad (7\text{-}6)$$

In general, sistemul de ecuații care se obține prin aplicarea metodei curenților ciclici, se scrie:

$$\left.\begin{aligned} R'_{11}\mathcal{I}_1 + R'_{12}\mathcal{I}_2 + \ldots + R'_{1p}\mathcal{I}_p &= E'_1 \\ R'_{21}\mathcal{I}_1 + R'_{22}\mathcal{I}_2 + \ldots + R'_{2p}\mathcal{I}_p &= E'_2 \\ R'_{p1}\mathcal{I}_1 + R'_{p2}\mathcal{I}_2 + \ldots + R'_{pp}\mathcal{I}_p &= E'_p \end{aligned}\right\} \qquad (7\text{-}7)$$

în care R'_{ii} reprezintă suma tuturor rezistențelor din ochiul i fiind totdeauna pozitivă iar R'_{ik} $(i \neq k)$ reprezintă suma rezistențelor comune care fac parte din ochiul i și din ochiul k; dacă sensurile curenților ciclici $\mathcal{I}_i$ și $\mathcal{I}_k$ coincid, atunci R'_{ik} se consideră pozitiv, - în caz contrar R'_{ik} este afectat de semnul minus. E'_i reprezintă suma algebrică a t.e.m. din ochiul i, semnul tensiunilor e.m. fiind precizat după regulile cunoscute (7.2.1.1). Intensitatea curentului dintr-o ramură care nu este comună la două ochiuri,

este egală chiar cu intensitatea curentului ciclic care o parcurge; valoarea curentului care parcurge o ramură comună la două ochiuri este egală cu suma algebrică a curenţilor ciclici care o străbat. Dacă se rezolvă sistemul de ecuaţii (7-7) prin aplicarea regulii lui Cramer, se obţine:

$$\mathcal{J}'_k = E'_1 \frac{\Delta k1}{\Delta} + E'_2 \frac{\Delta k2}{\Delta} + \ldots + E'_p \frac{\Delta kp}{\Delta} \quad , \qquad (7\text{-}8)$$

în care Δ este determinantul rezistenţelor de ochiuri, iar $\Delta_{k\ell}$ este determinantul minor al lui Δ relativ la linia de ordin ℓ şi la coloana de ordin k .

7.4. Metoda potenţialelor de noduri

O reţea de conductori poate fi studiată alegînd ca necunoscute auxiliare potenţialele nodurilor. Această metodă, numită şi metoda perechilor de noduri independente, se bazează pe aplicarea legii lui Ohm generalizată (6-70) la fiecare ramură componentă a reţelei.

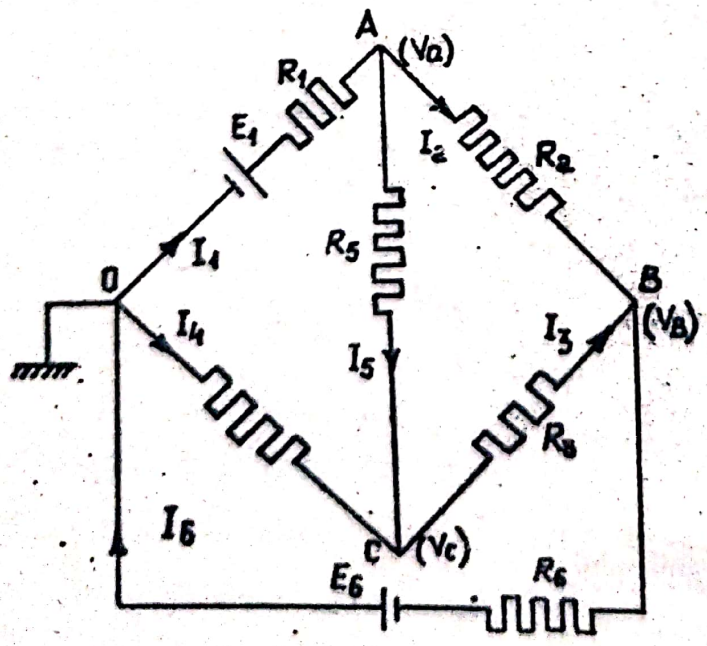


Fig. 7.5.

Practic, perechile de noduri independente se formează alegînd unul dintre noduri al cărui potenţial se ia origine, - obişnuit pus în legătură cu pămîntul - , la care se alătură, pe rînd, fiecare din nodurile rămase; dacă numărul de noduri este n , numărul de perechi de noduri indepen-

dente este

$$p = n - 1 \qquad (7\text{-}9)$$

Referindu-ne la schema din fig. (7-5), observăm că $p = 4 - 1 = 3$.

Luînd ca reper potenţialul punctului 0, - legat la pămînt -, notînd potenţialele celorlalte trei noduri cu (V_a), (V_b), (V_c) şi tensiunile de ramură cu $U_1, U_2, \ldots, U_k$, dacă se aplică legea lui Ohm se obţine:

$$\begin{aligned} V_o - V_a &= R_1 I_1 - E_1 = U_1 \\ V_a - V_b &= R_2 I_2 = U_2 \\ V_c - V_b &= R_3 I_3 = U_3 \\ V_o - V_c &= R_4 I_4 = U_4 \\ V_a - V_c &= R_5 I_5 = U_5 \\ V_b - V_o &= R_6 I_6 - E_6 = U_6 \end{aligned} \qquad (7\text{-}10)$$

Se observă că aceste ecuaţii conduc cu uşurinţă la ecuaţiile care se obţin prin aplicarea legii ochiurilor.

Curenţii care circulă prin cele şase ramuri ale reţelei au ca expresii, dacă se ţine seama că $V_o = 0$:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 + U_1}{R_1} = \frac{E_1 - V_a}{R_1} & I_4 &= \frac{U_4}{R_4} = \frac{-V_c}{R_4} \\ I_2 &= \frac{U_2}{R_2} = \frac{V_a - V_b}{R_2} & I_5 &= \frac{U_5}{R_5} = \frac{V_a - V_c}{R_5} \\ I_3 &= \frac{U_3}{R_3} = \frac{V_c - V_b}{R_3} & I_6 &= \frac{E_6 + U_6}{R_6} = \frac{E_6 + V_b}{R_6} \end{aligned} \qquad (7\text{-}11)$$

Se aplică apoi legea nodurilor în cazul luat ca exemplu, se obţin trei ecuaţii:

$$\begin{aligned} &(A) \quad I_1 - I_2 - I_5 = 0 \\ &(B) \quad I_2 + I_3 - I_6 = 0 \\ &(C) \quad I_4 + I_5 - I_3 = 0 \end{aligned} \tag{7-12}$$

Inlocuind, în ecuaţiile de mai sus (7-12) curenţii prin expresiile acestora, se obţine:

$$\begin{aligned} &\frac{E_1 - V_a}{R_1} - \frac{V_a - V_b}{R_2} - \frac{V_a - V_c}{R_5} = 0 \\ &\frac{V_a - V_b}{R_2} - \frac{V_c - V_b}{R_3} - \frac{E_6 + V_b}{R_6} = 0 \\ &\frac{-V_c}{R_4} + \frac{V_a - V_c}{R_5} - \frac{V_c - V_b}{R_3} = 0 \end{aligned} \tag{7-13}$$

sau

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{R_1} &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) V_a - \frac{1}{R_2} V_b - \frac{1}{R_5} V_c \\ -\frac{E_6}{R_6} &= -\frac{1}{R_2} V_a + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_6}\right) V_b - \frac{1}{R_3} V_c \\ 0 &= -\frac{1}{R_5} V_a - \frac{1}{R_3} V_b + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) V_c \end{aligned} \tag{7-14}$$

Membrul stîng I_j alfiecărei ecuaţii din sistemul de mai sus, conţine o sumă de termeni $\sum I'_k$, fiecare din aceştia, $I_k = \frac{E_k}{R_k}$, reprezentînd curentul care ar circula într-un circuit constituit dintr-o singură ramură k care are un capăt în nodul considerat, (N_j) datorită tensiunilor electromotoare care acţionează în acea ramură. In cazul nodului A (N_a),

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} \quad \text{şi} \quad I_a = \frac{E_1}{R_1}$$

Întrucît ramurile AB şi AC nu conţin generatori; iar în cazul nodului B (N_b) ,

$$I_6 = -\frac{E_6}{R_6} \quad \text{şi} \quad I_b = -\frac{E_6}{R_6}$$

In ultimul caz, curentul pleacă din nodul considerat B . Curentul I_k , - de scurt circuit - , se ia cu semnul plus cînd este îndreptat spre nod.

In membrul drept, coeficientul potenţialului V_j , al nodului N_j , este egal cu suma conductanţelor ramurilor care au capăt în acel nod (G_{jj}); coeficientul potenţialului V_k , al nodului N_k , este conductanţa ramurii jk care are un capăt în nodul N_j. (G_{jk}). Coeficientul G_{jj} , care este totdeauna pozitiv, se numeşte conductanţa proprie a nodului, iar coeficienţii G_{jk} , numiţi conductanţe comune sînt totdeauna afectate de semnul minus (acestea derivă din faptul că dacă curentul intră într-un nod N_j , acesta iese din nodul vecin N_k şi invers).

Cu notaţiile precizate mai sus, sistemul de ecuaţii de rezolvat (7-14) se scrie:

$$\begin{aligned} G_{aa}V_a - G_{ab}V_b - \ldots - G_{a,(n-1)}V_{n-1} &= I_a \\ -G_{ba}V_a + G_{bb}V_b - \ldots - G_{b,(n-1)}V_{n-1} &= I_b \\ -G_{n-1,a}V_a - G_{n-1,b}V_b - \ldots - G_{(n-1),(n-1)}V_{n-1} &= I_{n-1} \end{aligned} \qquad (7\text{-}15)$$

în care I_j (I_a, I_b ...) reprezintă suma curenţilor de scurt circuit a ramurilor care au un capăt în nodul N_j.

In cazul exemplului luat,

$$G_{aa} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \quad , \quad G_{ab} = -\frac{1}{R_2} \quad \text{şi} \quad G_{ac} = -\frac{1}{R_5}$$

dacă ne referim la nodul A (N_a).

După rezolvarea sistemului de ecuaţii de mai sus, (7-15), cunoscînd potenţialele V_j, se determină intensităţile curenţilor I_k din ramurile reţelei, aplicînd relaţiile scrise mai înainte (7 - 11).

Metoda perechilor de noduri independente este în general mai complicată; aplicarea acesteia este mai convenabilă în cazul reţelelor cu număr mic de noduri.

Observaţie. Aplicarea directă a legilor lui Kirchhoff ca şi aplicarea acestora prin metoda ochiurilor sau prin metoda potenţialelor de noduri este destul de greoaie. Uneori, cînd interesează să se studieze numai parţial o reţea de conductori, se pot utiliza, - după caz - , cîteva teoreme echivalente cu legile lui Kirchhoff, pentru ca rezultatul să se obţină mai uşor.

7.5. Suprapunerea regimurilor permanente

Dacă se aplică legile lui Kirchhoff la studiul unei reţele, se obţine un număr de ecuaţii care leagă intensităţile curenţilor din diversele ramuri ale acesteia, de tensiunile electromotoare şi tensiunile contraelectromotoare din reţea, aceste ecuaţii fiind de forma:

$$R_1I_1 + R_2I_2 + \ldots + R_kI_k + \ldots = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \ldots + \mathcal{E}_k + \ldots + \mathcal{E}'_1 + \mathcal{E}'_2 + \ldots + \mathcal{E}'_k + \ldots ,$$

în care unii termeni sînt egali cu zero.

Rezolvînd sistemul de ecuaţii în raport cu intensităţile curenţilor, se obţine pentru curentul I_k din ramura de rang k, avînd rezistenţa totală R_k şi conţinînd generatori şi receptori a căror sumă algebrică a t.e.m. şi t.c.e.m. este

E_k , o ecuaţie de forma:

$$I_k = \alpha_k^1 E_1 + \alpha_k^2 E_2 + \ldots + \alpha_k^k E_k + \ldots + \alpha_k^n E_n \qquad (7\text{-}16)$$

în care n este numărul de ramuri din care este constituită reţeaua. Coeficienţii α_k^n corespunzători fiecărei ramuri depind numai de rezistenţele din reţea.

Din cele de mai sus rezultă că fiecare intensitate I_k este funcţie liniară de tensiunile electromotoare (fiind incluse şi t.c.e.m.).

Din liniaritatea ecuaţiilor care se obţin prin aplicarea legilor lui Kirchhoff, rezultă o proprietate importantă a regimurilor permanente, după cum se va vedea.

Dacă rezistenţele tuturor ramurilor reţelei nu se modifică, dar se face ca sistemul de t.e.m. să fie E_1' , E_2' , ..., E_k', ... E_n' , se creează un alt regim permanent. Deoarece rezistenţele din reţea au rămas aceleaşi, ecuaţia care exprimă curentul din ramura de rang k devine:

$$I_k' = \alpha_k^1 E_1' + \alpha_k^2 E_2' + \ldots + \alpha_k^k E_k' + \ldots + \alpha_k^n E_n' \qquad (7\text{-}17)$$

Făcînd ca reţeaua să conţină simultan ambele sisteme de t.e.m., se va obţine pentru curentul din ramura de ordin k ecuaţia:

$$I_k'' = \alpha_k^1 (E_1 + E_1') + \alpha_k^2 (E_2 + E_2') + \ldots + \alpha_k^n (E_n + E_n') \qquad (7\text{-}18)$$

Din adunarea ecuaţiilor (7-16) şi (7-17) rezultă totodată că

$$I_k + I_k' = I_k'' \qquad (7\text{-}19)$$

Prin suprapunerea primelor două regimuri permanente

(staţionare) a rezultat un al treilea regim permanent, în care intensitatea curentului într-una din ramuri (I_k'') este egală cu suma intensităţilor curenţilor (I_k I_k') care circulau prin aceeaşi ramură în fiecare din regimurile permanente anterioare.

Concluzia se poate extinde şi este valabilă şi în cazul unui număr oarecare de suprapuneri.

Din cele de mai sus rezultă mai întîi că suprapunerea unor regimuri permanente presupune ca, referitor la fiecare ramură, să se adune algebric atît tensiunile e.m. şi t.c.e.m.,cît şi intensităţile curenţilor corespunzătoare fiecărui regim.

Totodată s-a demonstrat şi <u>teorema suprapunerii (stărilor de echilibru)</u> care se poate enunţa stfel: Prin suprapunerea unor regimuri permanente se obţine un nou regim permanent.

<u>Un caz particular</u> important se prezintă atunci cînd reţeaua nu conţine receptori.

In acest caz, curentul din ramura k , dacă singura t.e.m. din reţea este E_1 , are expresia:

$$I_k = \alpha_k' E_1$$

cu condiţia ca ceilalţi generatori din reţea să fie înlocuiţi prin rezistenţele lor interne.

Cînd acţionează pe rînd t.e.m. E_2 , E_3 , ... , atunci

$$I_k^2 = \alpha_k^2 E_2 \ , \ \ldots \ I_k^n = \alpha_k^n E_n$$

Din relaţia (-) şi ţinînd seama de expresiile de mai sus reiese că:

$$I_k = \sum_{j=1}^{n} I_k^j \qquad ; \qquad (7\text{-}20)$$

adică, în cazul cînd o reţea nu conţine receptori şi rezisten-

ţele ramurilor acesteia îşi păstrează valorile, intensitatea curentului dintr-o ramură oarecare este egală cu suma algebrică a intensităţilor care ar parcurge această ramură dacă ar acţiona pe rînd fiecare dintre generatorii din reţea; ceilalţi fiind înlocuiţi cu rezistenţele lor interne.

Această teoremă este utilă atunci cînd aplicarea legilor lui Kirchhoff este dificilă sau cînd rezolvarea ecuaţiilor obţinute în acest fel este laborioasă.

7.6. Teoremele sursei echivalente

7.6.1. Definiţii

In cazul cînd este necesar să se cunoască numai intensitatea curentului care parcurge o anumită ramură a unei reţele, sau intensitatea curentului care trece printr-o derivaţie nouă care se conectează între două puncte oarecare ale reţelei (fig. 7-6) este inutil să se aplice legile lui Kirchhoff pentru studiul întregii reţele; rezultatul se obţine pe o cale mult mai simplă, aplicînd teoremele sursei echivalente.

Un ansamblu de conductori, generatori şi receptori astfel dispuşi încît întregul grup de elemente active şi pasive este conectat între mai multe puncte de acces ale unei reţele, reprezintă o porţiune de reţea sau o reţea neizolată.

O reţea neizolată ar putea fi înlocuită cu o altă reţea fictivă, fără ca potenţialul punctelor de acces şi intensităţile curenţilor care trec prin acele puncte să se modifice; schema unei asemenea reţele fictive se numeşte schema echivalentă a reţelei pe care ar putea-o substitui.

O reţea neizolată, este conectată între două puncte ale unui circuit, numit circuit principal (fig. 7-6) , se nu-

meşte reţea dipolară activă sau dipol liniar activ. Curentul total I , care parcurge circuitul principal, este egal cu suma curenţilor care pleacă din nodul (borna) de intrare (A) sau care ajung la borna de ieşire (B).

7.6.2. Teorema sursei echivalente de tensiune (L.Thévenin - 1883). Dacă la bornele AB ale dipolului liniar activ (fig. 7-6) se conectează rezistenţa pasivă R , aceasta este parcursă de un curent de intensitate I , iar între bornele AB se atabileşte diferenţa de potenţial $V_A - V_B = RI$.

Teorema sursei echivalente de tensiune, spune că reţeaua dipolară activă M ar putea fi înlocuită cu un generator (sursă) de tensiune echivalent reţelei, conectat între punctele A şi B (fig. 7-6).

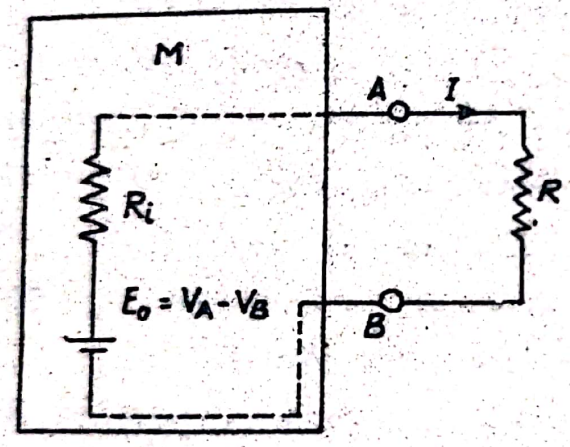


Fig. 7.6.

Intensitatea curentului care traversează o ramură suplimentară, constituită dintr-o rezistenţă pasivă, conectată între două puncte A şi B ale unei reţele, este aceeaşi care s-ar datora unei surse de t.e.m. E_o egală cu diferenţa de potenţial $V_A - V_B$ care exista între A şi B înainte de conectarea unei derivaţii şi de rezistenţă interioară R_i egală cu rezistenţa echivalentă a reţelei primitive între punctele A şi B (fig. 7-7 a,b).

Pentru demonstrarea acestei teoreme se aplică teorema suprapunerii la o reţea activă constituită din generatori şi rezistenţe (fig. 7-7 a).

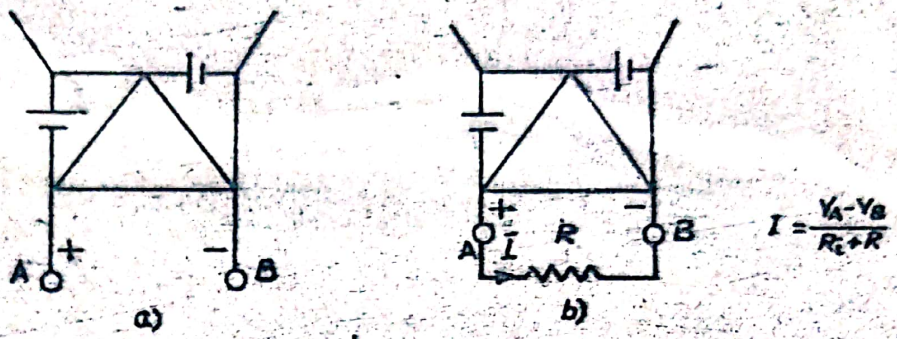


Fig. 7.7.

Intr-o primă stare de echilibru (fig. 7-8 a), toţi generatorii reţelei primitive sînt înlăturaţi şi înlocuiţi cu rezistenţele lor interioare, încît rezistenţa internă R_i a reţelei să rămînă aceeaşi (reţea pasivă) iar în noua ramură se introduce o sursă de t.e.m. $E_o = V_A - V_B$, legată de polul negativ la punctul B.

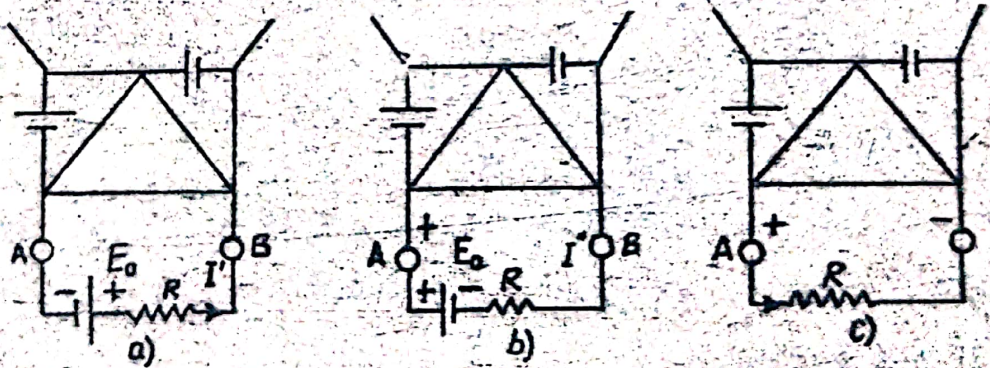


Fig. 7.8.

Intensitatea curentului prin ramura ARB va fi dată de expresia:

$$I' = \frac{E_o}{R_i + R} \qquad (7\text{-}21)$$

Intr-o a doua stare (b), se reintroduc generatorii în rețea, - aceasta devenind activă - . Deoarece generatorul fictiv din noua ramură are t.e.m. egală și în opoziție cu diferența de potențial $V_A - V_B$, intensitatea curentului I" prin ramura ARB va fi egală cu zero (I" = 0).

Suprapunînd cele două stări de echilibru, se obține starea care interesează; în această stare, intensitatea curentului va avea expresia:

$$I = I' + I'' = \frac{V_A - V_B}{R_i + R} \qquad (7\text{-}22)$$

în acord cu teorema lui Thévenin.

Sursa de tensiune echivalentă rețelei, are deci t.e.m. E egală cu diferența de potențial între punctele A și B, cînd rezistența R a ramurii suplimentare este infinită (R_∞); cu această precizare de notație, expresia (7-22) devine:

$$I = \frac{(V_A - V_B)R_\infty}{R_i + R} = \frac{E_0}{R_i + R} \qquad (7\text{-}23)$$

Teorema generatorului echivalent de tensiune se aplică în special cînd $R_i \ll R$; atunci

$$I = \frac{(V_A - V_B)R}{R} \qquad (7\text{-}24)$$

Observații. a. Teoremă de mai sus poate fi aplicată pentru cunoașterea intensității curentului care parcurge una din ramurile proprii ale rețelei, cînd aceasta nu conține o sursă de curent. In acest caz (fig. 7-7 a) se înlătură ramura AB de exemplu, și se măsoară $V_A - V_B$ și R_i între punctele A și B . Apoi se procedează cu ramura AB cum s-a procedat mai înainte cu noua ramură care nu făcea parte din rețeaua primitivă.

b. Dacă ramura suplimentară (nouă) conţine şi un generator (sau receptor) de t.e.m. E' , - în urma unui raţionament analog cu cel dezvoltat mai înainte - , sursa de tensiune echivalentă va avea t.e.m. $E_0 = V_A - V_B + E'$, în care expresia E' se ia cu semnul plus dacă, parcurgînd ramura ARB de la A la B, se iese prin polul pozitiv al generatorului.

7.6.3. Teorema sursei echivalente de curent (Norton). Aceeaşi reţea dipolară activă la bornele căreia s-a legat în serie o rezistenţă R , admite şi o altă schemă echivalentă, cunoscută sub denumirea de schema sursei echivalente de curent. De această dată, se consideră că o sursă de curent constant, $\frac{E_0}{R_i}$ debitează curent prin rezistenţele R şi R_i conectate în paralel între punctele A şi B (fig. 7-9).

Ca şi în cazul precedent,

$$V_A - V_B = RI$$

După teorema lui Thévenin (7-23) ,

$$I = \frac{(V_A - V_B)_{R_\infty}}{R + R_i}$$

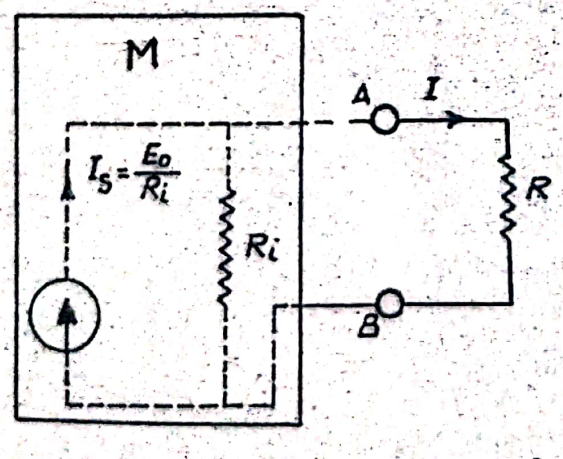


Fig. 7.9.

deci:

$$V_A - V_B = U_{AB} = R \frac{(V_A - V_B)_{R_\infty}}{R + R_i}$$

Introducînd, în relaţia de mai sus, în locul rezistenţelor, conductanţele

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{şi} \quad G_i = \frac{1}{R_i}$$

se obţine:

$$U_{AB} = \frac{G_i(V_A - V_B)_{R_{co}}}{G + G_i} = \frac{I_s}{G + G_i} \qquad (7\text{-}24)$$

$I_s = G_i(V_A - V_B)$ reprezintă curentul de scurt-circuit, dat de teorema lui Thévenin cînd $R = 0$:

$$I_s = \frac{(V_A - V_B)_{R_{co}}}{R_i} = G_i(V_A - V_B)_{R_{co}}$$

Relaţia (7-24) este expresia matematică a teoremei lui Norton: diferenţa de potenţial $V_A - V_B = U_{AB}$ de la capetele unei ramuri suplimentare, constituită dintr-o rezistenţă pasivă R, conectată între două puncte A şi B ale unei reţele active, este egală cu raportul dintre curentul (de scurt-circuit) I_s care parcurge reţeaua cînd este scurtcircuitată între acele puncte $(R = 0)$ şi suma conductanţelor, exterioară G şi interioară G_i egală cu conductanţa echivalentă a reţelei primitive între punctele A şi B.

Generatorul care debitează curentul

$$I_s = \frac{(V_A - V_B)_{R_{co}}}{R_i} = \frac{E_o}{R_i} = G_i E_o$$

şi are în permanenţă o conductanţă G_i între borne este generatorul de curent echivalent reţelei considerate, M.

Teorema generatorului echivalent de curent se aplică în special cînd $R_i \gg R (G_i \ll G)$ atunci

$$U_{AB} = \frac{I_s}{G}$$

7.7. Teorema reciprocității (Maxwell).

Să considerăm două ochiuri independente (O_k) și (O_ℓ) care fac parte dintr-o rețea oarecare, alimentată de un singur generator. Totodată să presupunem că fiecare din aceste ochiuri are cîte o ramură R_k, respectiv R_ℓ, care nu face parte din alt ochi; aceasta înseamnă, după cum s-a precizat (7-3) că prin acele ramuri curenții de ramură coincid cu cei de ochiuri: $I_k = \mathcal{J}_k$ și $I_\ell = \mathcal{J}_\ell$.

Dacă generatorul de t.e.m. E_k se află în ramura (R_k), intensitatea curentului prin ramura R_ℓ, - conform relației (7-8) va avea expresia:

$$I_\ell = \mathcal{J}_\ell = E_k \frac{\Delta_{\ell k}}{\Delta} \qquad (7\text{-}25)$$

Din aceleași motive, dacă generatorul de t.e.m. E_ℓ este plasat în ramura (R_ℓ), expresia intensității curentului prin ramura (R_k) este:

$$I_k = \mathcal{J}_k = E_\ell \frac{\Delta_{k\ell}}{\Delta} \qquad (7\text{-}26)$$

Deoarece cei doi determinanți minori sînt egali, $\Delta_{\ell k} = \Delta_{k\ell}$ datorită simetriei, rezultă:

$$\frac{E_k}{I_\ell} = \frac{E_\ell}{I_k} \qquad (7\text{-}27)$$

In cazul particular cînd $E_k = E_\ell = E$, atunci $I_\ell = I_k$.

Dacă o rețea conține un singur generator de t.e.m. E, toate rezistențele ramurilor rămînînd constante, intensitatea curentului I_ℓ prin ramura (R_ℓ) datorat sursei plasate într-o altă ramură, (R_k), este egală cu intensitatea curentului I_k, prin ramura (R_k), dacă sursa va fi plasată în ramura dintîi (R_ℓ).

7.8. Teorema transferului maxim de putere. Puterea cedată de un generator de rezistenţă interioară R_G, unui curent constituit din rezistenţe pasive, este maximă cînd rezistenţa circuitului pasiv (sarcinii) R, este egală cu aceea a generatorului.

Această teoremă, care interesează în mod deosebit la transportul energiei electrice se demonstrează destul de simplu, dacă ne referim la un generator de t.e.m. E, - sau la o reţea a cărei t.e.m. echivalentă între două puncte este U - de rezistenţă interioară R_G, şi la o rezistenţă pasivă ohmică R legată în serie cu generatorul (fig. 7-10). Intensitatea curentului I care parcurge rezistenţa R are ca expresie

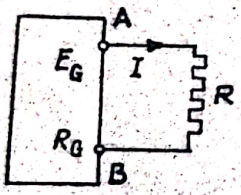


Fig. 7.10.

$$I = \frac{E}{R + R_G} \qquad (7\text{-}28)$$

Puterea absorbită de rezistenţa R, care este egală cu aceea cedată de generator,

$$P = RI^2 = E^2 \frac{R}{(R + R_G)^2} \qquad (7\text{-}29)$$

depinde atît de R_G cît şi de R.

Expresia lui P arată că puterea cedată de generator este cu atît mai mare cu cît, - R fiind constant - , R_G este mai mic.

In cazul cînd R este variabil, expresia (7-29) arată că P = 0 cînd R = 0 sau cînd $R \to \infty$. Din expresiile derivatelor întîia şi a doua a puterii în raport cu R se constată că puterea absorbită de R este maximă cînd $R = R_G$ şi că expresia puterii în acest caz este

$$P_m = \frac{E^2}{4R_G} \qquad (7\text{-}30)$$

7.9. Rezistenta echivalentă cu o rețea dipolară activă

7.9.1. Definiții. Un procedeu care simplifică studiul rețelelor constă în înlocuirea unei rețele dipolare pasive printr-o rezistență echivalentă.

Un ansamblu de conductori, generatori și receptori astfel dispuși încît întregul grup de elemente pasive și active este conectat între două puncte ale unui circuit, numit circuit principal, (fig. 7-11) se numește rețea dipolară. Curentul total I , care parcurge circuitul principal, este egal cu suma curenților care pleacă din nodul (borna) de intrare A sau care ajung la borna de intrare B .

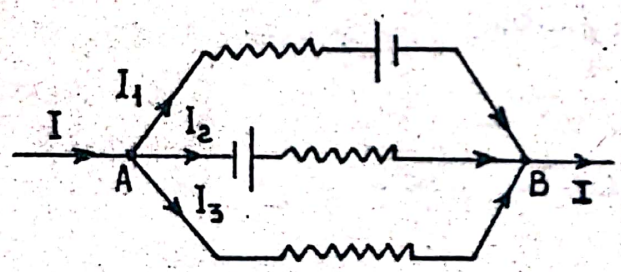


Fig. 7-11

Dacă rețeaua dipolară este constituită din rezistențe pasive, se numește rețea dipolară pasivă (fig. 7-12) sau pe scurt, dipol pasiv (AB).

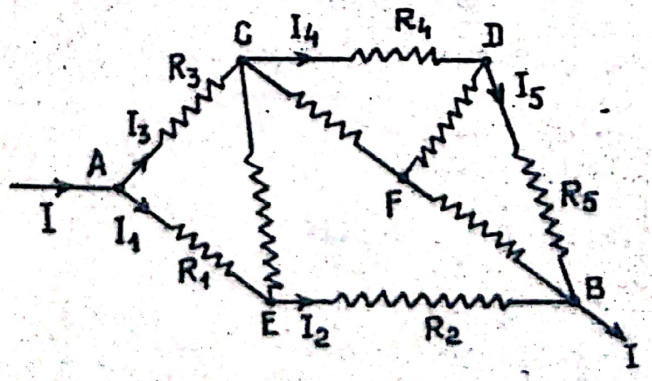


Fig. 7-12

Cînd toate ramurile dipolului au capetele în punc-

tele extreme ale acestuia (fig. 7-13), iar ramurile se mai numesc şi derivaţii, iar conectarea acestora se zice să se facă în paralel, sau în derivaţie.

7.9.2. Teorema conductanţelor. Să considerăm o reţea dipolară pasivă, ale cărei ramuri sînt legate în derivaţie (în paralel) între punctele A şi B ale unui circuit principal (fig. 7-13). Utilizînd notaţiile de pe această figură şi aplicînd legea nodurilor, se obţine:

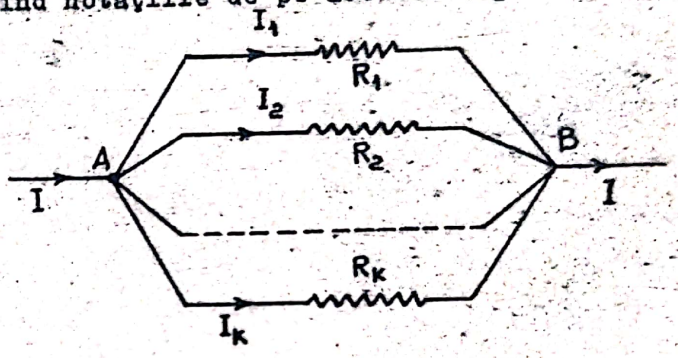


Fig. 7-13

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_k \ ;$$

în acelaşi timp, legea lui Ohm permite să se scrie că:

$$V_A - V_B = R_1 I_1 = R_2 I_2 = \ldots = R_k I_k = RI \ ,$$

unde R este rezistenţa întregii reţele dipolare.

Relaţiile de mai sus se pot scrie sub forma următoare:

$$V_A - V_B = \frac{I_1}{\frac{1}{R_1}} = \frac{I_2}{\frac{1}{R_2}} = \ldots = \frac{I_k}{\frac{1}{R_k}} = \frac{I_i}{\frac{1}{R_i}}$$

Din relaţiile de mai sus rezultă:

$$V_A - V_B = \frac{I}{\frac{1}{R}} = \frac{\sum I_i}{\sum \frac{1}{R_i}} \ ; \quad \text{deci} \quad \frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$$

Intensitatea curentului care circulă printr-o derivaţie, - curent derivat - , este proporţională nu numai cu diferenţa de potenţial $V_A - V_B$ de la bornele dipolului, ci şi cu intensitatea curentului principal total I. Un grup de k rezistenţe legate în paralel poate fi înlocuit printr-o singură rezistenţă R, datorită căreia căderea de potenţial între punctele A şi B ar rămîne aceeaşi, dacă rezistenţa R ar fi parcursă de curentul total I.

Valoarea acestei rezistenţe, numită rezistenţa echivalentă a unui grup de rezistenţe legate în paralel (derivaţie), se va calcula deci după formula:

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_k} \quad \text{sau} \quad C = \sum C_k \qquad (7\text{-}31)$$

Relaţia de mai sus este expresia matematică a teoremei conductanţelor; conductanţa unui grup de rezistori legaţi în paralel este egală cu suma conductanţelor rezistorilor componenţi.

In cazul a n rezistori R' egali, legaţi în paralel,

$$R = \frac{R'}{n} \qquad (7\text{-}32)$$

Observaţii. 1. Intensităţilor curenţilor din două derivaţii oarecare, - reţeaua fiind pasivă - , sînt invers proporţionale cu rezistenţele acestora:

$$\frac{I_1}{I_k} = \frac{R_k}{R_1} \qquad (7\text{-}33)$$

2. Rezistenţa echivalentă a unui grup de rezistori legaţi în derivaţie este mai mică decît oricare dintre rezistenţele rezistorilor componenţi.

3. Dacă unul dintre rezistorii legaţi în paralel are o rezistenţă de valoare practic nulă, curentul total I trece în întregime prin acest rezistor, iar ceilalţi rezistori se spune că sînt scurt-circuitaţi, prin aceştia netrecînd vreun curent (sau un curent de intensitate practic neglijabilă).

7.9.3. Rezistenţa echivalentă. Deoarece ecuaţiile lui Kirchhoff sînt liniare (7.2), aşa cum s-a arătat în paragraful precedent într-un caz particular, intensitatea curentului I_k dintr-o ramură a unei reţele dipolare pasive proporţională cu intensitatea totală I. Întrucît I_k este proporţional şi cu diferenţa de potenţial $V_A - V_B$ aplicată la capetele dipolului, se poate scrie, - urmînd orice traiectorie între punctele A şi B - , dacă ne referim la schema din fig. 7-12:

$$V_A - V_B = (V_A - V_C) + (V_C - V_D) + (V_D - V_B) = R_3 I_3 + R_4 I_4 + R_5 I_5 ,$$

sau

$$V_A - V_B = (V_A - V_E) + (V_E - V_B) = R_1 I_1 + R_2 I_2 \quad \text{etc}$$

Oricare din relaţiile de mai sus se poate scrie sub forma:

$$\boxed{V_A - V_B = RI} , \qquad (7\text{-}34)$$

în care R este rezistenţa echivalentă a dipolului; aceasta are o asemenea valoare încît, fiind traversată de un curent a cărui intensitate este egală cu I, diferenţa de potenţial de la capetele acestuia este egală cu $V_A - V_B$, adică cu diferenţa de potenţial existentă la capetele dipolului.

Pentru a determina rezistenţa echivalentă, este necesar să se studieze reţeaua care constituie dipolul pasiv şi să

se cunoască valorile intensităţilor curenţilor I_k . Relaţiile de mai sus arată că se poate cunoaşte apoi $V_A - V_B$ şi în cele din urmă valoarea lui R .

De cele mai dese ori însă, se evită procedeul indicat mai sus şi se înlocuieşte cu un procedeu care conduce la simplificarea calculelor prin consideraţii de simetrie şi prin transfigurarea reţelelor. Aceasta constă în modificarea unei porţiuni de reţea, fără ca în afara acelei porţiuni să se modifice distribuţia curenţilor şi deci a diferenţelor de potenţial.

Transfigurarea sau transformarea unei reţele se realizează în mod curent prin îndepărtarea unei ramuri care nu este parcursă de curent, - are rezistenţă infinită - , prin înlocuirea rezistenţelor legate în paralel cu una singură (echivalentă), prin înlocuirea unor rezistenţe legate în triunghi printr-un grup de rezistenţe legate în stea, - sau invers - , şi prin alte înlocuiri ale distribuţiei conductorilor dintr-o porţiune de reţea.

7.9.4. Transformarea triunghi - stea. Fie trei rezistenţe dispuse în triunghi, aşa cum se arată în fig. 7-14. Utilizînd notaţiile de pe figură şi aplicînd legile lui Kirchhoff, se obţine:

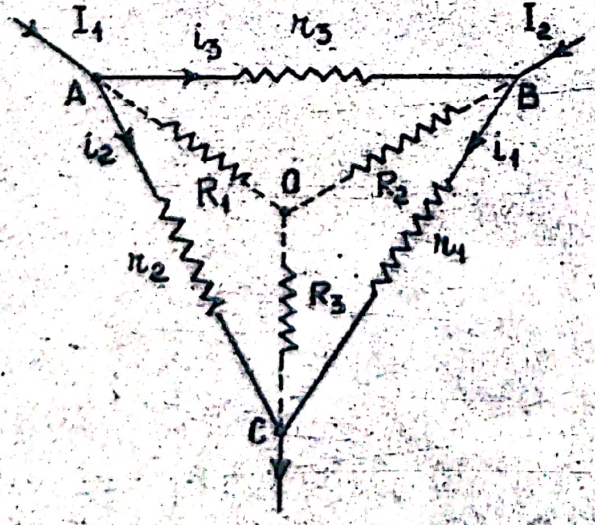


Fig. 7-14

(AOBA): $V_A - V_O = R_1 I_1$

$V_B - V_O = R_2 I_2$

$V_A - V_B = R_2 I_2$

şi $V_A - V_B = r_3 i_3$

(ABCA): întrucât $i_1 = I_2 + i_3$ şi $i_2 = I_1 - i_3$,

atunci

$$r_3 i_3 + (I_2 + i_3) r_1 - r_2 (I_1 - I_3) = 0$$

şi

$$i_3 = \frac{r_2 I_1 - r_1 I_2}{r_1 + r_2 + r_3}$$

Din cele de mai sus, rezultă :

$$V_A - V_B = R_1 I_1 - R_2 I_2 = r_3 \frac{r_2 I_1 - r_1 I_2}{r_1 + r_2 + r_3} ,$$

sau

$$I_1 \left(R_1 - \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}\right) = I_2 \left(R_2 - \frac{r_3 r_1}{r_1 + r_2 + r_3}\right)$$

Coeficienţii celor doi curenţi trebuie să fie egali, pentru ca relaţia de mai sus să fie satisfăcută pentru orice valori ale acestora.

Deci:

$$R_1 = \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3} , \quad R_2 = \frac{r_3 r_1}{r_1 + r_2 + r_3}$$ şi

prin permutare,

$$R_3 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_3} \qquad (7\text{-}35)$$

7.9.5. <u>Transformarea stea-triunghi</u>, mai puţin eficientă în studiul reţelelor, se tratează procedîn ca mai sus. Referindu-ne la aceeaşi figură (7-14), se pleacă de la rezultatele deja obţinute (7-35) care se pot scrie în felul următor:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{r_1}{r_2 r_3} + \frac{I}{r_3} + \frac{1}{r_2} \quad \text{etc.}$$

Pentru simplificarea scrierii, se introduc conductanţele $g = 1/r$ şi $G = 1/R$ şi se obţine:

$$G_1 = \frac{g_2 g_3}{g_1} + g_2 + g_3$$

Din relaţia de mai sus şi altele două deduse din expresiile rezistenţelor R_2 şi R_3, se poate scrie:

$$g_1 g_2 + g_2 g_3 + g_3 g_1 = g_1 G_1 = g_2 G_2 = g_3 G_3 \ .$$

Notînd

$$g_1 g_2 + g_2 g_3 + g_3 g_1 = K$$

şi

$$g_1 = \frac{K}{G_1} \ ; \quad g_2 = \frac{K}{G_2} \ , \quad g_3 = \frac{K}{G_3} \ ,$$

prin înlocuirea celor trei conductanţe în ecuaţia de mai sus cu expresiile acestora, avem:

$$\frac{K^2}{G_1 G_2} + \frac{K^2}{G_2 G_3} + \frac{K^2}{G_3 G_1} = K$$

şi

$$K = \frac{G_1 G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}$$

Cele de mai sus conduc la relaţiile căutate:

$$g_1 = \frac{G_2 G_3}{G_1+G_2+G_3} \ ; \quad g_2 = \frac{G_3 G_1}{G_1+G_2+G_3} \ ; \quad g_3 = \frac{G_1 G_2}{G_1+G_2+G_3}$$

sau

$$r_1 = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \ , \qquad r_2 = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} \ ,$$

$$r_3 = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \qquad (7\text{-}36)$$

7.10. Aplicatii ale legilor lui Ohm si Kirchhoff

7.10.1. Sunt si rezistentă aditională

7.10.1.1. Suntul este o rezistenţă care se leagă în paralel cu o porţiune de circuit, - constituită din diverse elemente - , cu scopul de a micşora intensitatea curentului care traverseză acea porţiune de circuit. Dacă şuntul se leagă în derivaţie cu un instrument de măsură, efectul său are ca urmare lărgirea domeniului de măsurare a acelui instrument. Aşa se procedează, în special, în cazul instrumentelor de măsură magnetoelectrice: galvanometre, miliampermetre etc. (fig.7-15).

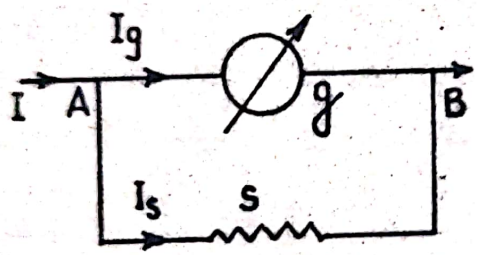


Fig. 7-15

Dacă rezistenţa interioară a instrumentului este g şi se cere ca intensitatea curentului I_g care traverseză instrumentul să fie de n ori mai mică decît aceea a curentului total I, care trebuie să fie valoarea şuntului s?

Prin aplicarea legilor lui Kirchhoff, se obţine:

$$I = I_g + I_s \quad \text{şi} \quad gI_g = sI_s$$

şi pentru că

$$n = \frac{I}{I_g}, \qquad \boxed{s = \frac{g}{n-1}}, \qquad (7\text{-}37)$$

în care n se numeşte puterea multiplicatoare a suntului sau coeficient de suntare (factor de multiplicare). In mod curent, $n = 10, -50, -100$; atunci $s = 9, -49, -99$.

Prin şuntare, rezistenţa aparatului, - instrument şunt - , ca şi sensibilitatea acestuia au devenit de n ori

mai mici faţă de acelea ale instrumentului iniţial.

Un ampermetru, care se leagă totdeauna în serie, perturbă cu atît mai puţin regimul de funcţionare al reţelei în care este conectat, cu cît puterea pe care o consumă este mai mică, $P = gI_g^2$; în cazul instrumentelor magnetoelectrice, instrumentul poate consuma o putere de 10^{-5} W, iar în acela al instrumentelor electrodinamice o putere de ordinul a 5 W. Ampermetrele consumă cu atît mai puţin cu cît rezistenţa acestora este mai mică; şuntul acestor aparate poate fi de $10^{-1} - 10^{-4}\,\Omega$.

7.10.1.2. <u>Rezistenţa adiţională</u>, este o rezistenţă legată în serie cu un miliampermetru (ampermetru) cu scopul de a obţine un aparat cu ajutorul căruia să se poată măsura diferenţele de potenţial (tensiunile), adică un voltmetru (fig. 7-16).

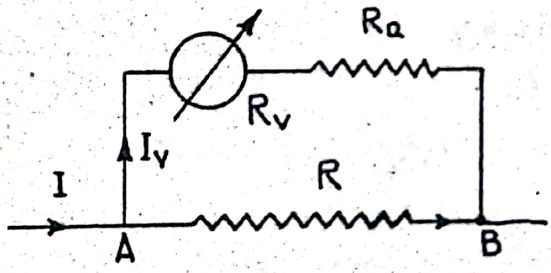


Fig. 7-16

Dealtfel, orice rezistenţă care joacă un rol asemănător, poartă numele de rezistenţă adiţională.

Voltmetrul se conectează totdeauna în paralel cu porţiunea de circuit la capetele căreia se măsoară tensiunea. R_a fiind mare, I_v va fi atît de mic încît se poate considera, - cu o anumită aproximaţie - , că atît $V_A - V_B$, cît şi I nu s-au modificat prin conectarea aparatului (voltmetrului).

Instrumentul este gradat acum în produsul R_vI_v, adică în volţi. In lipsa rezistenţei adiţionale, tensiunea maximă care se poate măsura cu instrumentul (miliampermetrul) este R_vI_v, dacă I_v este intensitatea maximă pe care o poate suporta miliampermetrul. Pentru a extinde domeniul de măsură a instrumentului gradat în volţi, de $\underline{m}$ ori, se introduce rezistenţa

adiţională R_a a cărei valoare va fi calculată după relaţia:

$$mR_V I_V = (R_V + R_a)I_V \quad ,$$

adică

$$R_a = R_V(m - 1) \qquad (7\text{-}38)$$

Voltmetrele perturbă cu atît mai puţin regimul de funcţionare al reţelei în care este conectat, cu cît puterea pe care o consumă este mai mică, $R_V I_V^2$, adică, cu cît rezistenţa lor este mai mare:

$$P = R_V I_V^2 = \frac{U^2}{R_V}$$

Un voltmetru magnetoelectric cu o rezistenţă interioară de 2.10^4 ohmi pe volt consumă aproximativ 10^{-2}W.

7.10.2. Gruparea generatorilor

7.10.2.1. Gruparea în serie. In cele ce urmează, se va considera cazul, - frecvent folosit în practică - , a grupării unor generatori identici; totodată se va presupune că la bornele grupului de generatori este conectată o rezistenţă pasivă.

Dacă borna pozitivă a unui generator este legată la borna negativă a generatorului următor şi în final grupul de generatori are ca pol negativ borna primului generator şi ca pol pozitiv borna celui din urmă, s-a realizat o grupare în serie a generatorilor (fig. 7-17).

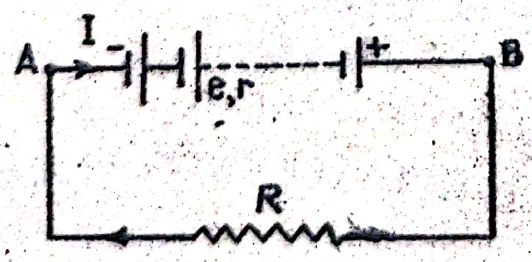


Fig. 7-17

Dacă se grupează n generatori, legea lui Ohm generalizată (6 - 70) permite să se scrie:

$$(V_A - V_B)_G = \sum rI - \sum e \quad ,$$

şi

$$(V_A - V_B)_R = - RI \quad ,$$

de unde

$$\boxed{I = \frac{ne}{R + nr}} \qquad (7\text{-}39)$$

Grupul de generatori montaţi în serie se comportă ca un generator de t.e.m. $E = ne$ şi de rezistenţă interioară $\rho = nr$.

Această grupare este convenabilă în cazul generatorilor de rezistenţă interioară mică, cum sînt acumulatorii ($\rho \sim 10^{-2}\Omega$). Avantajul grupării constă în aceea că permite obţinerea unui curent de intensitate mare în circuit. Intensitatea maximă a curentului care parcurge circuitul este limitată de rezistenţa $(R + nr)$ şi de intensitatea maximă a curentului pe care îl poate debita fiecare generator fără a se deteriora, aceasta fiind o caracteristică de construcţie. In cazul, nerecomandabil, cînd se asociază în serie generatori care pot debita curenţi de intensităţi maxime diferite, curentul maxim pe care îl poate debita grupul de generatori este egal cu curentul maxim de valoarea cea mai mică pe care-l poate debita unul dintre generatori.

7.10.2.2. <u>Gruparea în paralel</u>. In acest caz, polii pozitivi ai generatorilor se leagă împreună şi cei negativi la fel (fig.7-18).

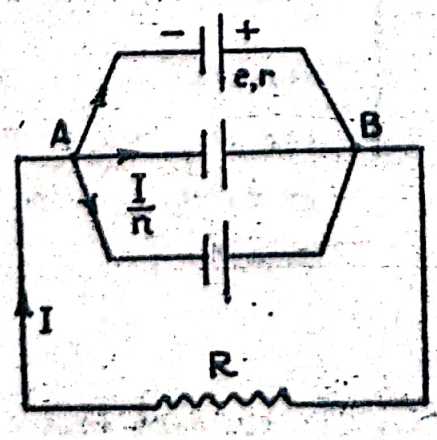


Fig.7-18

Legea lui Ohm generalizată (6-70), aplicată la una din ramurile grupării de generatori şi la circui-

tul exterior conduce la:

$$(V_A - V_B)_G = r\frac{I}{n} - e$$

şi

$$(V_A - V_B)_R = -RI \ ,$$

de unde

$$I = \frac{e}{R + \frac{r}{n}} \qquad (7\text{-}40)$$

Grupul de generatori legaţi în paralel se comportă ca un generator de t.e.m., E = e şi de rezistenţă interioară $\rho = \frac{r}{n}$. In general, acest montaj nu se foloseşte pentru motivul că ρ este mai mic de cît r , - deoarece r are el însuşi valori mici (fracţiuni de ohm) - , ci pentru că în acest fel se poate obţine în porţiunea de circuit exterioară, R , un curent maxim egal cu suma curenţilor maximi pe care îi pot debita, - prin construcţie - , cei n generatori.

7.10.2.3. Gruparea mixtă. Se alcătuiesc p serii de q elemente legate în serie, cele p serii fiind apoi conectate în paralel (fig.7-19). Această grupare este echivalentă cu un generator de t.e.m. E = qe şi de rezistenţă interioară

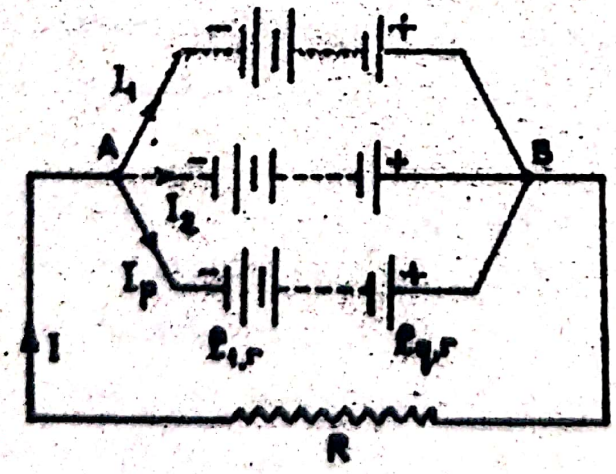


Fig.7-19

$$\rho = \frac{q}{p} r \ .$$

Dacă numărul total de generatori din care este constitu-

tuită gruparea mixtă este $n = q \cdot p$, atunci

$$I = \frac{qe}{R + \frac{qr}{p}} = \frac{ne}{pR + qr} \qquad (7\text{-}41)$$

Formula de mai sus permite să se găsească, pentru n dat, valorile lui p şi q , astfel ca să se obţină un curent I de valoare maximă, R fiind de asemenea dat.

Condiţia teoretică este ca $pR = qr$; practic, dacă se obţine pentru p sau q un număr fracţionar, se alege pentru p o valoare apropiată de aceea obţinută prin calcul dar aşa fel încît, atît q cît şi $p \times q = n$ să fie numere întregi.

Observaţie. Dacă porţiunea de circuit exterioară grupării de generatori conţine în afară de rezistenţe pasive, generatori şi receptori, atunci se aplică legile lui Kirchhoff.

7.10.3. Măsurarea tensiunilor electromotoare şi a diferenţelor de potenţial

7.10.3.1. Divizorul de tensiune. Acest dispozitiv, numit impropriu "potenţiometru", este constituit dintr-un reostat cu cursor, C , alimentat de la un generator de t.e.m. E (fig.7-20).

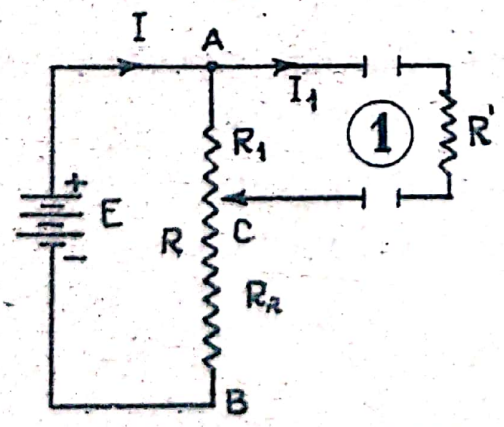


Fig.7-20

Dispozitivul de rezistenţă totală constantă $R = R_1 + R_2$, permite să se alimenteze un circuit oarecare (1) de la o sursă de tensiune U mai mică decît E ; tensiunea U are o valoare care depinde de poziţia cursorului, - cînd C se deplasează spre B , R_1 ca şi $V_A - V_C = U$ cresc .

Dacă I_1 din circuitul (1) este neglijabil faţă de intensitatea curentului $I = \frac{E}{R}$ care circulă prin reostat, prin faptul că R' are o valoare mare, atunci divizorul de tensiune reprezintă pentru aparatele conectate la extremităţile lui R_1, - în punctele A şi C - , un generator care după teorema lui Thévenin are t.e.m. U şi rezistenţa interioară ρ date de relaţiile:

$$U = R_1 I = E\frac{R_1}{R} \quad \text{şi} \quad \rho = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1(R-R_1)}{R}$$

Cînd I_1 nu este neglijabil faţă de I , atunci generatorul echivalent are o t.e.m. V mai mică de cît U . Aplicînd legea lui Ohm, se obţine:

$$E = V + (R - R_1)\left(I_1 + \frac{V}{R_1}\right)$$

şi

$$V = \frac{ER_1}{R} - \frac{R_1(R - R_1)I_1}{R} = U - \rho I_1$$

7.10.3.2. <u>Măsurarea unei tensiuni electromotoare şi a unei diferenţe de potenţial cu un voltmetru.</u> a. Pentru a măsura t.e.m. a unei pile (acumulator) se conectează la bornele acesteia un voltmetru (fig. 7-21). T.e.m. a unui generator este egală cu d.d. potenţial de la bornele sale numai cînd acesta nu debitează curent, ori voltmetrul indică o deviaţie în urma faptului că este parcurs de un curent de intensitate

$$I = \frac{E}{R_v + R_i} ,$$

unde R_v este rezistenţa totală a voltmetrului şi R_i rezistenţa interioară a generatorului. Se pune deci întrebarea: cu

ce abatere de la adevărata valoare se măsoară t.e.m. a unui generator, cu un voltmetru ?

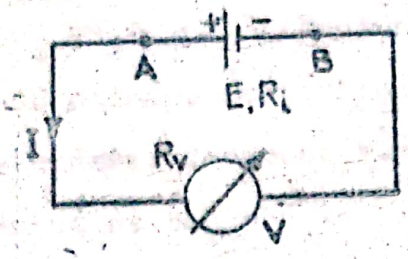


Fig. 7-21

Voltmetrul indică tensiunea

$$U = E - R_i I = E - R_i \frac{E}{R_v + R_i} =$$

$$= E\left(1 - \frac{R_i}{R_v + R_i}\right)$$

Erorile sistematice, absolută şi relativă, care afectează rezultatul măsurării, au ca expresie:

$$E - U = \Delta E = E \frac{R_i}{R_v + R_i} \quad \text{şi} \quad \frac{E-U}{E} = \frac{R_i}{R_v + R_i} \simeq \frac{R_i}{R_v} \qquad (7\text{-}42)$$

In practică, adesea este suficient ca $\frac{\Delta E}{E} \simeq 0{,}1\%$; aceasta înseamnă că $R_v \simeq 10^3 R_i$, ceea ce se realizează frecvent, întrucît rezistenţa interioară a pilelor este de maximum cîţiva ohmi (cu rare excepţii) iar a acumulatorilor de fracţiuni de ohm.

b. Pentru a măsura d.d. potenţial dintre două puncte ale unei porţiuni de circuit AB , de rezistenţă R , constituită din diverse aparate (fig. 7-22), se conectează în derivaţie cu acea porţiune de circuit un voltmetru de rezistenţă interioară R_v. Voltmetrul perturbă cu atît mai puţin regimul de funcţionare al reţelei şi măsura este cu atît mai precisă, cu cît rezistenţa sa interioară este mai mare; cu notaţiile de pe figură se poate scrie:

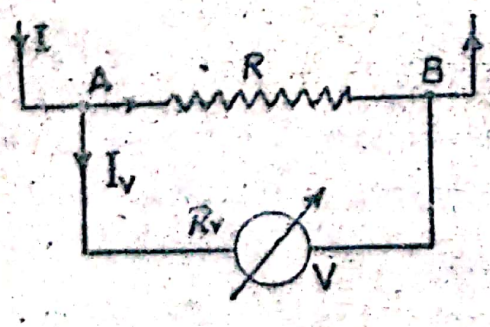


Fig. 7-22

$$U = RI \quad , \quad U' = \frac{R_v R}{R_v + R} I$$

şi

$$\frac{U - U'}{U} = \frac{R}{R_v + R} \simeq \frac{R}{R_v}$$

7.10.3.3. Măsurarea unei t.e.m. sau a unei diferenţe de potenţial prin metoda opoziţiei

7.10.3.3.1. Metoda opoziţiei de măsurare a t.e.m. Această metodă permite să se măsoare, prin compensaţie, o t.e.m., sau o d.d. potenţial, cu ajutorul unei surse de t.e.m. cunoscută cu o precizie bună.

O reţea, M , din care face parte sursa a cărei t.e.m. trebuie măsurată şi o altă reţea, M' , auxiliară, cu ajutorul căreia se poate realiza o d.d. potenţial variabilă şi cunoscută, se leagă în serie un galvanometru, astfel ca sursele din cele două reţele să fie în opoziţie, - polii pozitivi ai surselor să fie conectaţi la aceeaşi bornă (fig. 7-23).

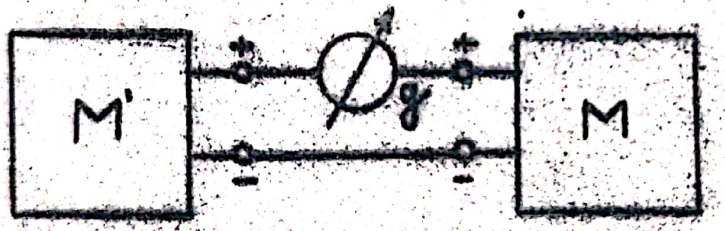


Fig. 7-23

a. Varianta cu reostat (cu fir)

α. Relaţii şi modul de lucru

In această variantă, o instalaţie de măsură a t.e.m. bazată pe această metodă, are circuitul secundar constituit dintr-un acumulator de t.e.m. E şi un fir calibrat AB de mare rezistivitate, - de rezistenţă totală R - , pe care poate luneca un cursor C , iar circuitul de studiat cuprinde sursa a cărei t.e.m., $\mathcal{E}$, se măsoară, o rezistenţă de protecţie R şi

un întrerupător Morse, K ; galvanometrul de rezistenţă interioară g , este conectat în serie cu cele două reţele (fig.7-24).

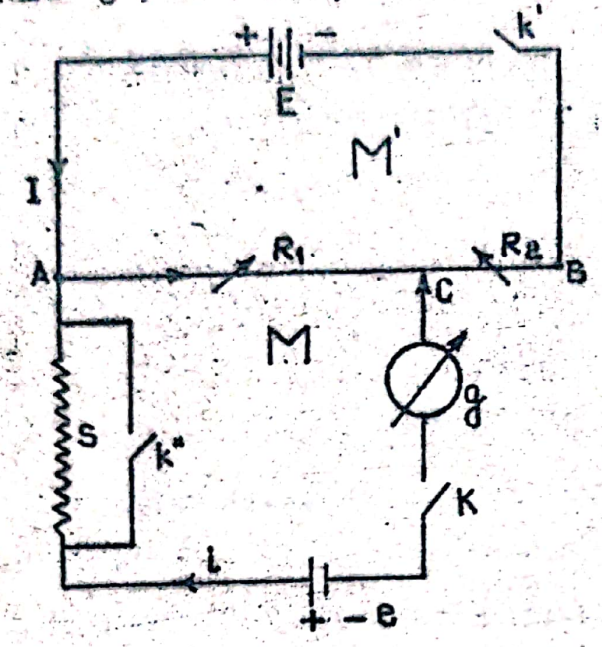


Fig. 7-24

Dacă rezistenţa totală a reţelei M' este $R_1+R_2=R$ şi rezistenţa totală a ramurii derivate între punctele A şi C este

$$\varrho = r + s + g ,$$

aplicînd legile lui Kirchhoff, se obţine:

$$R_1(I + i) + R_2 I = E$$

$$R_1(I + i) + \varrho i = e$$

de unde

$$i = \frac{e(R_1 + R_2) - ER_1}{\varrho(R_1 + R_2) + R_1R_2} \qquad (7\text{-}43)$$

Deplasîndu-se contactul lunecător C de la A spre B, R_1 creşte cu aceeaşi cantitate cu cît scade R_2 şi se poate ajunge la situaţia cînd $i = 0$. In acel moment, din expresia lui i (7-43) rezultă:

$$\frac{e}{E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \qquad (7\text{-}44)$$

Cu alte cuvinte, tensiunii e.m. de măsurat e , i se opune d.d. potenţial V variabilă şi cunoscută, care este egală cu căderea de potenţial pe porţiunea AC a firului calibrat; cînd $i = 0$,

$$V = R_1 I = R_1 \frac{E}{R_1 + R_2} ,$$

şi întrucît $e = V$ în momentul cînd galvanometrul indică absenţa curentului prin ramura derivată (deci avem de a face cu o metodă de zero), se poate scrie:

$$\boxed{e = E \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \qquad (7\text{-}45)$$

Rezistenţa s, de ordinul a $(10^4 - 10^5)\,\Omega$, are rolul de a proteja galvanometrul şi a nu permite pilei (sursei) de studiat să debiteze un curent mai mare de $\sim 10^{-5}$ A, ca să nu se altereze. În apropierea echilibrului, rezistenţa s se scurtcircuitează cu întrerupătorul K" şi instalaţia devine mult mai sensibilă.

β. Sensibilitatea instalaţiei, cînd echilibrul este aproape atins, se defineşte prin relaţia:

$$s = \frac{\Delta\alpha}{\Delta e} , \qquad (7\text{-}46)$$

în care

$$\Delta e = e - E \frac{R_1}{R_1 + R_2} ,$$

iar

$$\Delta\alpha = S_I \Delta i_g \qquad (7\text{-}47)$$

S_I fiind sensibilitatea galvanometrului.

La echilibru, cînd t.e.m. de măsurat este aproape compensată, expresia intensităţii curentului indicat de galvanometru este:

$$\Delta i_g = \frac{\Delta e}{r + g + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{\Delta e}{R_t} \qquad (7\text{-}48)$$

Pentru un acelaşi Δe , Δi_g este mic , cînd numitorul expresiei de mai sus este mai mare. Cum r şi g au valori date, se poate acţiona numai asupra rezistenţelor R_1 şi R_2 . Expresia $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, care se poate scrie şi sub forma:

$$f(R_1) = \frac{R_1 (R - R_1)}{R} ,$$

are valoarea minimă cînd $R_1 = R_2 = \frac{R}{2}$. Pentru ca $f(R_1)$ să fie cît mai mare (deci Δi_g mic), trebuie ca R_1 să fie cît mai diferit de R_2 . Curentul Δi_g va fi deci mai mic; (practic, această condiţie nu este convenabil satisfăcută, întrucît prin firul calibrat trebuie să treacă un curent de intensitate mare, care îl poate încălzi sau deteriora. Totodată, şi acumulatorul trebuie să debiteze un curent mare şi aceasta poate conduce la variaţia tensiunii de la bornele sale.

In practică se preferă ca R_2 să fie mic; această condiţie poate fi satisfăcută cînd R este apropiat ca valoare, - dar mai mare - , decît g .

Din relaţiile (7-46), (7-47), (7-48) rezultă că pînă la urmă, sensibilitatea instalaţiei are ca expresie:

$$S = \frac{S_1}{R_t} ; \qquad (7\text{-}49)$$

o instalaţie de măsurare a t.e.m. bazată pe metoda opoziţiei are o sensibilitate cu atît mai mare, cu cît rezistenţa R_t (rezistenţa celor două reţele plus aceea a galvanometrului) deci şi cu cît R (rezistenţa circuitului auxiliar) au valori

mai mici, iar galvanometrul este mai sensibil.

Observaţie. Dacă se aplică metoda opoziţiei la măsurarea t.e.m. aşa cum s-a descris mai sus, adică dacă determinarea lui ε depinde de cunoaşterea lui E (7-45), atunci rezultatul măsurării nu poate fi precis, întrucît nu se pot realiza surse de curent (acumulatori) care să debiteze timp îndelungat curenţi de ordinul a $(10^{-1} - 10^{-5})$ A şi să-şi menţină în acelaşi timp constantă tensiunea la borne. De aceea se aplică metoda comparaţiei.

b. Metoda prin comparaţie conduce la rezultate mult mai precise. De această dată circuitul auxiliar mai conţine o rezistenţă variabilă Rh (necunoscută) cu ajutorul căreia se face ca intensitatea curentului care parcurge rezistenţele R_1 şi R_2 să fie suficient de mică şi ca R_1 să fie apropiat ca valoare de R ($R = R_1 + R_2$) (fig. 7-25).

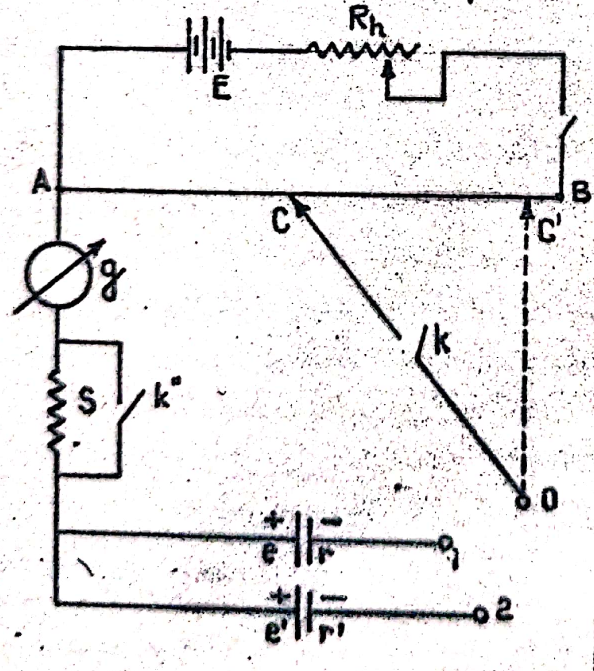


Fig. 7-25

Făcîndu-se contactul 0-1 şi procedîndu-se cum s-a descris mai înainte, se obţine echilibrul cînd cursorul are poziţia C , - corespunzînd rezistenţei R_1 ; făcînd contactul 0-2 (contactul 0-1 fiind întrerupt) se introduce în instalaţie o sursă etalon (pilă Weston) , de t.e.m. ε' ; acesteia îi corespunde, la

echilibru, o rezistenţă R_1', determinată de poziţia C' a cursorului. Scriind relaţia (7-45) pentru ambele cazuri, şi făcînd raportul expresiilor obţinute, rezultă:

$$\boxed{\frac{e}{e'} = \frac{R_1}{R_1'}} \qquad (7\text{-}50)$$

Precizia metodei opoziţiei, varianta prin comparaţie, depinde de precizia cu care se cunoaşte t.e.m. e' a sursei etalon, dar şi de varianta de realizare practică a metodei. In cazul variantei cu reocord, a cărei sensibilitate este mare ($R \simeq 20\ \Omega$), deoarece rezistenţele R_1 şi R_2 sînt proporţionale cu lungimile $AC = \ell$ şi $AC' = \ell'$ ale reocordului, se poate scrie:

$$\frac{e}{e'} = \frac{\ell}{\ell'}$$

Precizia măsurătorilor efectuate cu o instalaţie realizată după această variantă este mică, - erorile fiind de ordinul a 1% - , deoarece nu se pot cunoaşte cu precizie lungimile ℓ şi ℓ' (intervin dimensiunile contactului lunecător), pentru că firul nu este perfect calibrat şi pentru că apar unele t.e.m. parazite (datorită curenţilor mari care parcurg firul). Totuşi această variantă este practică în cazul unor măsurători rapide şi nu poate fi înlocuită cu un voltmetru de clasă 0,2 de exemplu, - cu care se pot obţine rezultate mai precise - , deoarece voltmetrul consumă energie, iar în cazul metodei opoziţiei, sursa de studiat nu debitează curent.

Una din cele mai utilizate variante, este <u>varianta Beuty</u> (sau varianta cu cutii de rezistenţe gemene) (fig.7-26).

In acest caz, rezistentele R_1 şi R_2, se realizează cu ajutorul a două cutii de rezistenţe de mare precizie (construite cu o eroare de pînă la 10^{-3} %) ale căror valori sînt mari (de ordinul a $10^4 - 10^5 \Omega$). Aceste rezistenţe a căror sumă este egală cu R, - celelalte rezistenţe din circuitul auxiliar fiind neglijabile -, pot fi variate în trepte de 1Ω sau de $0{,}1\Omega$ (cu cît se creşte R_1, cu atît se scade R_2).

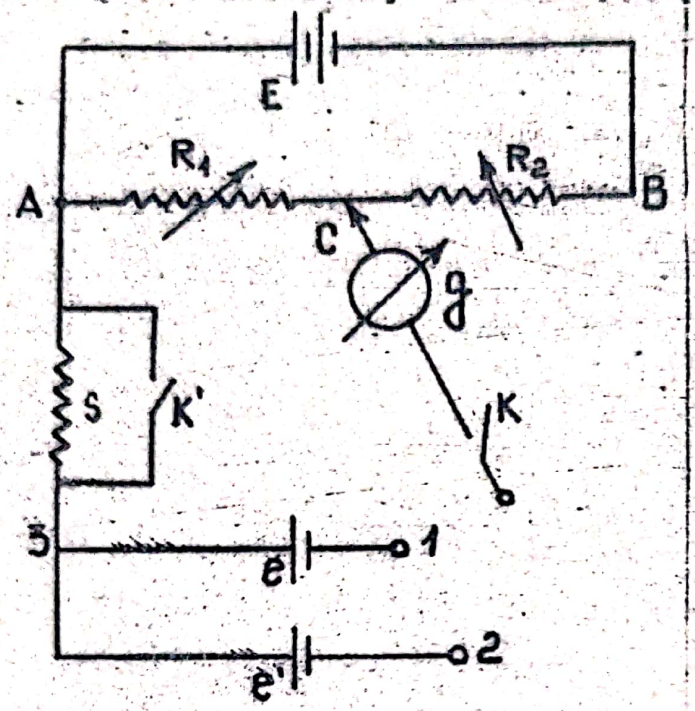


Fig. 7-26

Sensibilitatea acestei variante este mai mică decît a aceleia cu reocord, deoarece R este mai mare, însă rămîne suficient de bună pentru a permite obţinerea de rezultate a căror eroare poate să nu depăşească 10^{-2} %.

Această precizie se poate obţine numai dacă se îndeplinesc anumite condiţii şi se iau precauţii speciale.

Rezistenţele, ca şi t.e.m. a surse etalon trebuie cunoscute cu o eroare mai mică de 10^{-4} (se foloseşte obişnuit o pilă Weston a cărei t.e.m. este de 1,0186 V la 20°C şi variază cu 4.10^{-5} Volt/grad).

Sursa de alimentare a circuitului auxiliar (acumulatorul) trebuie să poată debita un curent de intensitate constan-

tă cît timp durează măsurătoarea (un acumulator de capacitate mare şi bine încărcat asigură această condiţie). Este necesar ca cutiile de rezistenţă şi sursa etalon să fie menţinute la temperatură constantă (prin termostatare) şi totodată ca instalaţia să fie parcursă de curenţi numai un timp scurt, care permit observarea deplasării spotului (utilizînd întrerupătoare de tip Morse).

Măsurarea unei diferenţe de potenţial prin metoda opoziţiei. Metoda opoziţiei permite să se măsoare diferenţe de potenţial între două puncte P şi Q ale unui circuit oarecare. Tensiunii U dintre punctele P şi Q i se opune o tensiune cunoscută şi variabilă cum este aceea dintre punctele A şi C de pe schema din fig. 7-27. Pentru măsurarea tensiunii U, punctele P şi Q se conectează la bornele 1 şi 3 (unde se găsea e) (fig. 7-26), după cum arată schema din fig. 7-27. Ca şi mai înainte, se reglează R_1 pînă ce galvanometrul nu mai indică nici un curent; în acel moment, cum U joacă rolul lui e, va fi valabilă relaţia:

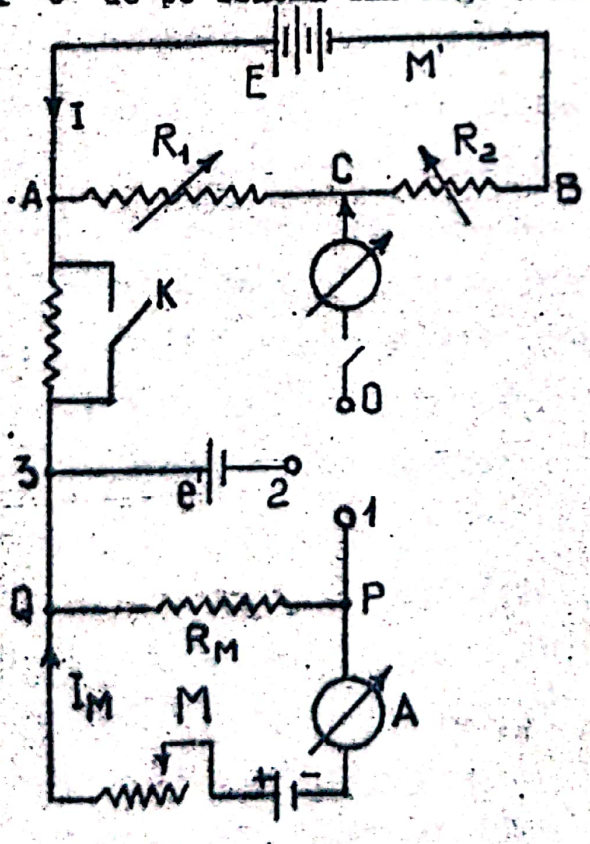


Fig. 7-27

$$\frac{U}{e'} = \frac{R_1}{R_1'} \qquad (7\text{-}51)$$

dacă se aplică metoda comparaţiei. Pentru atingerea echilibru-

lui, este necesar ca $E > U$ ($V_Q - V_P = U$) și ca punctul Q, aflat la potențial mai mare decît P, să fie conectat în același punct (3) cu polul pozitiv al sursei din circuitul secundar M'.

Dacă se respectă cele ce s-a menționat referior la măsurarea unei t.e.m. prin metoda opoziției, cu această metodă se pot măsura diferențele de potențial cu o eroare de sub 0,1 %.

Observații. a. Utilizîndu-se aceeași instalație (fig. 7-27), metoda opoziției permite să se măsoare și intensitățile de curent: cunoscînd pe U prin măsurare, dacă R_M este o rezistență etalon, se poate măsura $I_M = \frac{U}{R_M}$. (In acest fel se poate etalona ampermetrul A din circuitul principal M).

b. Această metodă, fiind în același timp o metodă de zero, permite măsurarea t.e.m. a unei surse de putere oricît de mică, deoarece în momentul echilibrului, aceasta nu debitează curent (în timpul măsurătorii, sursa debitează un curent de ordinul a 10^{-4} A un timp de ordinul secundei). Totodată, metoda permite măsurarea unei tensiuni între două puncte ale unei rețele, fără să perturbe regimul de funcționare al acesteia, din motivele menționate mai sus.

7.10.4. Măsurarea rezistențelor

7.10.4.1. Metoda ampermetrului și voltmetrului. Această metodă de măsurare indirectă a rezistențelor pasive se bazează pe legea lui Ohm; cu un ampermetru se măsoară intensitatea I a curentului care parcurge rezistența de măsurat R, iar cu un voltmetru se măsoară diferența de potențial U de la capetele acesteia; valoarea rezistenței va fi dată de formula

$$R = \frac{U}{I} \qquad (7\text{-}52)$$

Precizia rezultatelor obţinute depinde, ca şi în cazul altor măsurători, de calitatea celor două instrumente. Totodată, se vede că principiul metodei conduce la afectarea rezultatelor de erori sistematice care depind de energia consumată de ampermetru şi de voltmetru. Pentru ca aceste erori să fie cît mai mici, se utilizează, în funcţie de valoarea rezistenţei de măsurat, două montaje.

7.10.4.1.1. Montajul aval (în derivaţie scurtă). In acest caz, voltmetrul se conectează la extremităţile rezistenţei de măsurat (fig. 7-28).

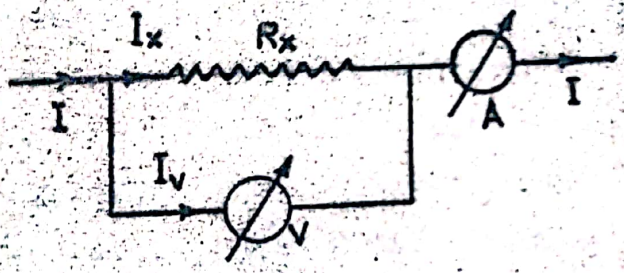


Fig. 7-28

Acesta măsoară corect diferenţa de potenţial U de la capetele rezistenţei, însă ampermetrul indică suma curenţilor I_x şi I_v care parcurg, respectiv, pe R_x şi voltmetrul de rezistenţă interioară R_v. Valoarea aproximativă R_x a rezistenţei de măsurat se va calcula după formula

$$R'_x = \frac{U}{I} \qquad (7\text{-}53)$$

iar valoarea efectivă R_x după relaţia:

$$R_x = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} \qquad (7\text{-}54)$$

Folosind formula (7-53) în locul relaţiei (7-54), se

- 396 -

obţine deci un rezultat afectat de o <u>eroare sistematică prin lipsă</u>.

<u>Eroarea sistematică relativă</u> care afectează rezultatul măsurării în cazul acestui montaj are expresia:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{R'_x}{R_v} \qquad (7\text{-}55)$$

Relaţiile (7-54), (7-55) arată că montajul aval permite să se obţină rezultate afectate de erori sistematice cu atît mai mici, cu cît rezistenţa voltmetrului este mai mare. Acest montaj este utilizat la măsurarea rezistenţelor de ordinul unităţilor sau zecilor de ohmi. Dacă U se măsoară cu un voltmetru electrostatic, sau cu un compensator (potenţiometru), rezultatele măsurătorilor sînt afectate numai de erori accidentale.

7.10.4.1.2. <u>Montajul amonte</u> (în derivaţie lungă). De această dată voltmetrul se conectează la capetele porţiunii de circuit MN constituită din rezitenţa de măsurat în serie cu ampermetrul (fig. 7-29).

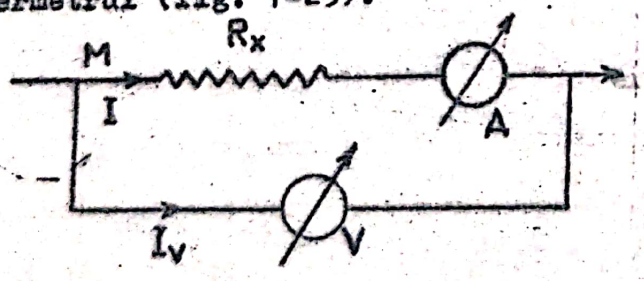


Fig. 7-29

Deci voltmetrul va indica diferenţa de potenţial de la capetele ramurii MN şi nu de la capetele rezistenţei, iar ampermetrul va măsura curentul care parcurge rezistenţa de măsurat.

Dacă se foloseşte pentru determinarea lui R_x formula (7-53), se obţine un rezultat afectat de o <u>eroare sistema-</u>

tică prin adaug; valoarea efectivă putîndu-se obţine cu relaţia:

$$R_x = \frac{U - R_a I}{I} , \qquad (7\text{-}56)$$

unde R_a reprezintă rezistenţa interioară a ampermetrului.

In cazul acestui montaj, eroarea sistematică relativă care afectează rezultatul măsurătorilor se calculează după formula:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{R_a}{R_x} \qquad (7\text{-}57)$$

Relaţiile (7-56), (7-57) arată că erorile sistematice relative care afectează rezultatele măsurătorilor obţinute cu montajul amonte sînt cu atît mai mici, cu cît R_a este mai mic decît R_x. Montajul acesta se foloseşte la măsurarea rezistenţelor mai mari de $10^2\,\Omega$.

Observaţie. Cu metoda ampermetrului şi voltmetrului se pot măsura rezistenţe pasive de valori cuprinse între $1\,\Omega$ şi $10^5\,\Omega$, cu o eroare sub 1% ($\sim 0{,}1\%$).

Erorile relativ mari de care sînt afectate rezultatele măsurătorilor, nu se datorează atît erorilor sistematice, cît erorilor accidentale care depind de clasa instrumentelor folosite (erori de construcţie) şi de modul de lectură a indicaţiilor instrumentelor (erori de lectură). De aceea se recomandă, - ca în cazul oricărei metode de deviaţie - , ca deviaţiile indicate de cele două instrumente să fie cît mai apropiate de limitele scărilor.

Această metodă prezintă avantajele că este simplă şi permite să se efectueze măsurători rapide chiar în condiţiile de lucru, ceea ce o face să fie frecvent utilizată în industrie.

7.10.4.2. Metoda punţii Wheatstone.

7.10.4.2.1. Teoria sumară a punţii. După cum s-a spus deja (7.2.3) şi după cum se vede din fig. 7-3, dipolul pasiv AC , constituit din cinci rezistenţe, alimentat de la o sursă de curent continuu, se numeşte punte Wheatstone. Dacă această reţea este folosită la măsurarea rezistenţelor sau a altor mărimi electrice, - după cum se va vedea mai tîrziu - , se spune că se aplică metoda punţii.

Pentru a studia puntea Wheatstone, se pleacă, aşa cum s-a arătat (7.2.3), de la sistemele de ecuaţii, provenite prin aplicarea legilor lui Kirchhoff, care s-au stabilit deja. Cînd puntea este echilibrată, prin "puntea" BD propriu-zisă care uneşte un punct al ramurii ABC cu un punct al ramurii ADC, nu mai trece curent, adică $I_g = 0$. Condiţia aceasta fiind satisfăcută, - prin reglarea convenabilă a celor trei rezistenţe - , se ajunge uşor la relaţia care permite cunoaşterea rezistenţei necunoscute R_x , cînd se cunosc celelalte trei rezistenţe care alcătuiesc patrulaterul ABCD.

Pentru a aprofunda cunoştinţele referitoare la această punte, este necesar să se exprime I_g , în funcţie de elementele reţelei; prin rezolvarea sistemului de ecuaţii stabilit, se obţine:

$$I_g = E \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{R(R_1+R_4)(R_2+R_3) + g(R_1+R_2)(R_3+R_4) + gR(R_1+R_2+R_3+R_4)+R_1R_2(R_3+R_4)+R_3R_4(R_1+R_2)} \qquad (7\text{-}58)$$

Cînd $R_1R_3 = R_2R_4$, atunci $I_g = 0$; puntea este echilibrată.

Dacă $R_x = R_3$, o variație a acestei rezistențe cu ΔR_x în jurul valorii corespunzătoare echilibrului, va determina prin "puntea" BD un curent a cărui expresie, considerînd pe R neglijabil, este

$$\Delta I_g = \frac{E\left[R_1(R_x + \Delta R_x) - R_2R_4\right]}{g(R_1 + R_2)(R_x + R_4) + \mathcal{T}} , \qquad (7-59)$$

în care

$$\mathcal{T} = R_1R_2R_x + R_2R_xR_4 + R_xR_4R_1 + R_4R_1R_2$$

Acest curent, traversînd galvanometrul, va determina o deplasare $\Delta\alpha$ a spotului pe riglă, dată de relația:

$$\Delta I_g = K\Delta\alpha \qquad (7-60)$$

în care K este constanta permanentă (de curent) a galvanometrului.

Din cele două relații de mai sus, ținînd seama că în apropierea echilibrului se poate considera $R_1R_x \approx R_2R_4$, se obține:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R_x} = \frac{E}{K} \cdot \frac{R_1}{g(R_1 + R_2)(R_x + R_4) + \mathcal{T}} , \qquad (7-61)$$

relație care exprimă sensibilitatea S a punții.

Pentru mărirea lui S, se poate folosi un galvanometru oricît de sensibil ($K = 10^{-11}$ A/mm/m), însă nu se poate folosi o sursă de t.e.m. oricît de mare, deoarece intensitatea curentului prin brațele punții nu trebuie să depășească 10^{-2} A.

Studii detaliate au condus la concluzia că sensibili-

Sensibilitatea punţii Wheatstone în curent continuu este maximă cînd

$$R_1 = R_2 = R_x = R_4 = R = g \quad , \qquad (7-62)$$

condiţii care nu se pot realiza în practică; sensibilitatea punţii nu contribuie la creşterea erorilor care afectează rezultatele măsurătorilor efectuate cu puntea Wheatstone, dacă abaterea de la condiţiile de mai sus nu este prea mare, ceea ce se petrece în practică.

Puntea Wheatstone este realizată sub diverse variante practice; ne vom opri numai a două dintre acestea, care sînt frecvent folosite.

7.10.4.2.2. <u>Puntea cu fir</u>. Dacă rezistenţa necunoscută este $R_x = R_3$, atunci

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_4 \qquad (7-63)$$

Cele două rezistenţe cu care se realizează raportul $\frac{R_2}{R_1}$ variabil în mod continuu şi cunoscut, sînt constituite din cele două porţiuni ale unui fir cilindric AC calibrat, pe care lunecă un cursor (contact mobil) (fig. 7-30). R_1 şi R_2 fiind proporţionale cu lungimea firului, relaţia de mai sus se poate scrie:

$$R_x = \frac{l_2}{l_1} R \qquad (7-64)$$

dacă se notează $R_4 = R$. Practic, echilibrul punţii

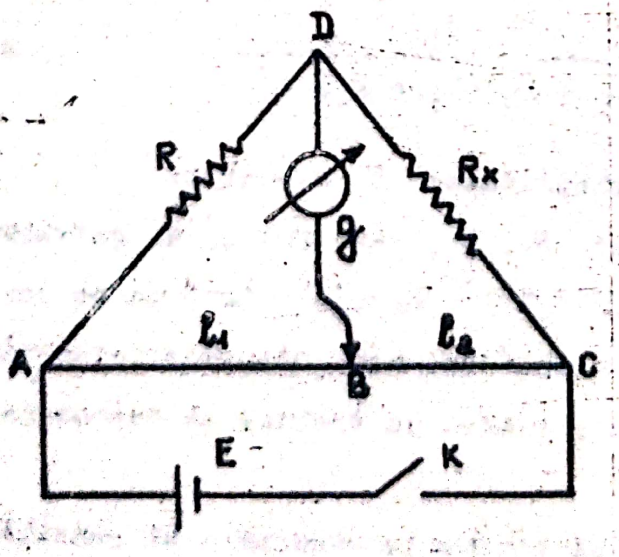


Fig. 7-30

s-ar putea obţine dînd lui R_4 o anumită valoare şi apoi deplasînd cursorul pînă ce prin galvanometru nu mai trece curent. In realitate se procedează altfel, pentru ca eroarea de măsurătoare să fie cît mai mică.

Eroarea relativă asupra lui R_x se calculează după relaţia :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2}$$

Dar

$$\Delta \ell_1 = \Delta \ell_2 = \Delta \ell$$

este eroarea de lectură a celor două lungimi ℓ_1 şi ℓ_2 ; aceasta nu poate fi mai mică decît grosimea cursorului care este de aproximativ 1 mm (poziţia cursorului se cunoaşte cu ajutorul unei rigle gradate, - de aproximativ 1 m lungime - , pe care se sprijină firul AC). Dacă lungimea firului este L, relaţia de mai sus se poate scrie:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{L}{\ell_1 (L - \ell_1)} \Delta \ell$$

Eroarea relativă va fi minimă, cînd produsul $\ell_1(L-\ell_1)$ va fi maxim, deoarece $\frac{\Delta R}{R}$ este constantă. Intrucît suma celor doi factori este constantă, produsul acestora va fi maxim cînd

$$\ell_1 = L - \ell_1 = \ell_2 \quad ; \qquad (7\text{-}65)$$

atunci şi $R = R_x$.

Dacă această condiţie este îndeplinită,

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + 4 \frac{\Delta \ell}{L} \qquad (7\text{-}66)$$

s-ar putea obține dînd lui R_4 o anumită valoare și apoi deplasînd cursorul pînă ce prin galvanometru nu mai trece curent. In realitate se procedează altfel, pentru ca eroarea de măsurătoare să fie cît mai mică.

Eroarea relativă asupra lui R_x se calculează după relația :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2}$$

Dar

$$\Delta \ell_1 = \Delta \ell_2 = \Delta \ell$$

este eroarea de lectură a celor două lungimi ℓ_1 și ℓ_2 ; aceasta nu poate fi mai mică decît grosimea cursorului care este de aproximativ 1 mm (poziția cursorului se cunoaște cu ajutorul unei rigle gradate, - de aproximativ 1 m lungime - , pe care se sprijină firul AC). Dacă lungimea firului este L, relația de mai sus se poate scrie:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{L}{\ell_1 (L - \ell_1)} \Delta \ell$$

Eroarea relativă va fi minimă, cînd produsul $\ell_1(L-\ell_1)$ va fi maxim, deoarece $\frac{\Delta R}{R}$ este constantă. Intrucît suma celor doi factori este constantă, produsul acestora va fi maxim cînd

$$\ell_1 = L - \ell_1 = \ell_2 \quad ; \qquad (7\text{-}65)$$

atunci și $R = R_x$.

Dacă această condiție este îndeplinită,

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + 4 \frac{\Delta \ell}{L} \qquad (7\text{-}66)$$

In consecinţă pentru măsurarea lui R_x se procedează în felul următor: se plasează cursorul în mijlocul firului calibrat şi se ia $R = \infty$; făcînd un contact scurt cu întrerupătorul K , se observă în ce parte a scării se deplasează spotul (de exemplu spre dreapta); această deviaţie este produsă de faptul că I_g traversează galvanometrul avînd sensul de la B spre D . Orice valoare s-ar da lui R şi deviaţia spotului ar fi de aceeaşi parte (dreapta), atunci $R_x < R$; dacă $R = \infty$ şi spotul nu se deplasează, înseamnă că şi $R_x = \infty$. Se dă apoi lui R valoarea zero ($R = 0$); spotul se va deplasa spre stînga, deoarece curentul care parcurge galvanometrul are sensul de la D spre B . Orice valoare a lui R care produce o deviaţie a spotului de aceeaşi parte (stînga), este mai mică decît aceea a lui R_x ($R < R_x$) ; dacă spotul nu deviază cînd $R = 0$, înseamnă că şi $R_x = 0$. Operaţia descrisă mai sus reprezintă o verificare a instalaţiei şi totodată permite să se găsească repede valoarea lui R care să fie apropiată de aceea corespunzătoare echilibrului (domeniul în care se găseşte această valoare se îngusteaza, ştiind că dacă $R < R_x$ deviaţia spotului este de o parte a lui zero de pe scara galvanometrului şi dacă $R > R_x$, deviaţia spotului are loc în sens contrar. Atunci se menţine valoarea lui R fixă, şi se deplasează fin cursorul pînă se obţine echilibrul perfect al punţii.

Iniţial se lucrează cu galvanometrul şuntat; cînd se ajunge în apropierea echilibrului se înlătură şuntul pentru a se reda punţii întreaga sensibilitate.

Cu această variantă a punţii se pot face măsurători rapide, însă erorile de măsurare sînt relativ mari (rareori scad sub 1%), datorită în primul rînd faptului că firul nu este

perfect calibrat şi în al doilea rînd datorită erorii de lectură a poziţiei cursoului, sensibilitatea galvanometrului ($K \sim 10^{-8}$ A/mm/m) este departe de a constitui o sursă de erori.

Puntea cu fir este convenabilă în special cînd se compară rezistenţe de valori apropiate.

7.10.4.2.3. Puntea cu cutii de rezistenţe. Trei dintre braţele punţii sînt constituite din rezistenţe de mare precizie. In acest caz, se menţine fix raportul $\frac{R_2}{R_1}$ şi se variază R_4 pînă cînd se obţine echilibrul punţii, procedînd aşa cum s-a descris în paragraful precedent. In apropierea echilibrului, dacă treapta de variaţie a rezistenţei R_4 (de 1Ω sau 0,1Ω) nu permite realizarea echilibrului perfect se aplică interpolarea. Acest procedeu, care permite obţinerea unei precizii mai mari (o zecimală în plus) se bazează pe faptul că ΔI_g, - în apropierea echilibrului - , este proporţional cu ΔR_x, aşa cum s-a arătat (7-59). Obişnuit, se ia $\frac{R_2}{R_1} = 1$; acest raport se ia subunitar sau supraunitar, după cum R_x are valoare mică ($1\Omega - 10^2\Omega$) sau mare ($10^4\Omega - 10^6\Omega$).

Pentru a evita deteriorarea galvanometrului, se închide mai întîi întrerupătorul K şi apoi K' ; acesta din urmă este un întrerupător Morse, care permite să se realizeze contacte de durată scurtă.

Cu puntea Wheatstone se pot măsura rezistenţe cuprinse între aproximativ 1Ω şi $10^6\Omega$; rezistenţele de valori medii ($\sim 10^3\Omega$) se pot măsura cu erori sub 10^{-5} (lungimea, masa, timpul se pot cunoaşte cu precizie mergînd pînă la $10^{-7} - 10^{-8}$). Această precizie foarte mare (10^{-6}) se poate obţine numai dacă se lucrează la temperatură constantă, dacă puntea

este parcursă de curenţi foarte mici (10^{-4} A) pentru a nu se crea diferenţe de temperatură care să determine apariţia unor t.e.m. termoelectrice şi dacă toate contactele sînt bune; este evident că toate rezistenţele variabile trebuie să fie cunoscute cu cel puţin aceeaşi precizie.

Pe baza faptului că ΔI_g este proporţional cu ΔR_x, se poate măsura temperatura cu o precizie pînă la 0,01°, dacă unul din braţele punţii este un fir de platină supus încălzirii (termometru cu rezistenţă), în gama de -180°C + 630°C.

Alt caz cînd măsurarea unei mărimi neelectrice este adusă la măsurarea unei rezistenţe (cu puntea Wheatstone), îl prezintă măsurarea deformaţiilor pe care le suferă un corp solid supus întinderii; acestea se aprecizează pe baza măsurării variaţiei rezistenţei unui fir subţire care este lipit de acel corp.

Observaţie. In cazul rezistenţelor mai mici de 1Ω ($1\Omega - 10^{-6}\Omega$) cînd încep să conteze rezistenţele firelor de legătură şi a contactelor faţă de rezistenţa de măsurat, metoda punţii Wheatstone conduce la rezultate afectate de erori mari sau foarte mari. Atunci se utilizează puntea dublă a lui Thomson, asupra căreia nu ne oprim.

De asemenea, dacă rezistenţele de măsurat sînt foarte mari ($>10^6\Omega$), sensibilitatea punţii Wheatstone scade atît de mult încît erorile de măsurare sînt de neacceptat. In aceste cazuri se aplică diverse metode speciale; cu unele din acestea vom face cunoştinţă mai tîrziu.

CAPITOLUL 8 . ELECTROLIZA

CAPITOLUL 8. ELECTROLIZA

8.1. Curentul electric prin lichide. Electroliți

Dacă se introduc doi conductori metalici, numiți electrozi, într-un vas care conține un lichid aflat la o temperatură oarecare și se conectează electrozii la o sursă de curent continuu, se constată că intensitatea curentului care traversează lichidul depinde mult de natura acestuia.

Metalele topite sînt foarte bune conducătoare de electricitate, - ca și în stare solidă; mercurul la 20°C și plumbul la 340°C au rezistivitatea de aproximativ $\rho = 10^{-6}\ \Omega$ m.

Lichidele care prin răcire prezintă cristale moleculare sînt izolatori mediocri sau destul de buni; apa pură, la 20°C are $\rho = 10^{5}\ \Omega$ m, iar petrolul la aceeași temperatură are $\rho = 2.10^{14}\ \Omega$ m.

Lichidele provenind din solide care prezintă cristali ionici, cum sînt acizii, bazele și sărurile topite, sînt bune conducătoare de electricitate (NaCl la 750°C are $\rho \simeq 3{,}5.10^{3}$ Ω m); asemenea lichide se numesc electroliți. Aceiași compuși ionici dizolvați într-un solvent ionizant, se numesc de asemenea electroliți, sau soluții de electrolit, întrucît se comportă ca conductori electrolitici. O soluție în apă de NaCl, avînd concentrația de 100 kg/m^3, are, la 18°C, $\rho \simeq 0{,}1$ Ωm; iar una de SO_4, - în aceleași condiții -, are $\rho \simeq 0{,}3$ Ω m.

Electroliţii se numesc uneori "conductori de gra- (speţa) doi", metalele fiind de gradul (speţa) întîi.

Trecerea curentului electric prin metale în stare solidă sau lichidă, - care se datorează deplasării în ansamblu a electronilor liberi pe care îi conţin - , nu este însoţită de transport de substanţă (metal).

Trecerea curentului continuu prin electroliţi, sau prin soluţii de electroliţi, după cum se va vedea, are ca urmare un transport de substanţă şi o serie de reacţii chimice.

Transformările pe care le suferă un electrolit cînd este traversat de curent continuu, constituie fenomenul de <u>electroliză</u>. In aceasta constă, dealtfel, efectul chimic al curentului electric continuu. Curenţii alternativi care îşi păstrează sensul un timp scurt ($\sim 2.10^{-3}$s), şi curenţii de scurtă durată, nu produc acest fenomen, din cauză că sarcinile electrice care intervin sînt prea mici.

Un ansamblu constituit dintr-un vas din substanţă izolantă (sticlă, ebonită, cuarţ etc.) în care se găseşte un electrolit, sau o soluţie de electrolit, şi doi electrozi, - unul fiind legat la polul pozitiv al unei surse de curent continuu (<u>anod</u>) şi altul la polul negativ (<u>catod</u>)- , se numeşte <u>voltametru</u> (electrizor, sau celulă elotrolitică).

Solventul ionizant cel mai important este apa; alte lichide care pot îndeplini acelaşi rol sînt: amoniacul lichid, acetona, acidul formic etc. In cele ce urmează, ne vom referi numai la cazurile cînd solventul este apa, care sînt cele mai frecvente şi au o importanţă practică deosebită.

8.2. Mecanismul conductiei ionice în [illegible]liti

8.2.1. Introducere. Electroliza şi legile acesteia pot fi explicate prin teoria ionică; aceasta se bazează pe ipoteza lui Svante Arrhenius (1877); un electrolit este disociat în ioni (un electrolit în soluţie este parţial disociat) fără ca acesta să fie traversat de un curent electric (în absenţa unui cîmp electric). Ionii sînt atomi sau grupe de atomi care poartă sarcini electrice pozitive (cationi) sau negative (anioni). Ionii nu au aceleaşi proprietăţi chimice ca şi atomii, sau radicalii din care provin; de exemplu, ionii unui metal alcalin cum sînt Na^+, K^+ etc., nu reacţionează cu apa. Un ion poartă un număr întreg (frecvent pînă la trei) de sarcini elementare; numărul de sarcini elementare pe care le poartă un ion se numeşte electrovalenţă (pozitivă, sau negativă, după semnul sarcinilor). De exemplu, sarea de bucătărie disociază prin topire, sau prin dizolvare în apă, în ionii Na^+ şi Cl^-, clorura de cupru în Cu^{++} şi $2Cl^-$ etc. Un electrolit este neutru din punct de vedere electric întrucît numărul sarcinilor elementare purtate de cationi este egal cu acela al sarcinilor elementare purtate de anioni.

Intrucît forţele care se exercită între ionii de semne contrare din electroliţi, sau din soluţiile de electroliţi, sînt mult mai slabe decît acelea care se exercită între aceiaşi ioni în cristalele din care provin, un cîmp electric face ca anionii să se deplaseze în sens contrar acestuia şi cationii în acelaşi sens. Cationii sînt constituiţi din atomi simpli de hidrogen, sau metalici (H^+, Ag^+, Cu^{++} etc.); singurul cation complex ar fi NH_4^+ (grupul amoniu). Anionii pot fi constituiţi din atomi simpli de metaloid (Cl^- etc.) sau din

grupe de atomi ca SO_4^{--} , OH^-, NO_3^- etc.

8.2.2. Electroliza fără reacții secundare. Intr-un electrolizor [illegible], anodul fiind electrodul prin care intră curentul, și catodul prin care iese -, ionii sînt supuși acțiunii unui cîmp electric $\vec{E}$ și în consecință, se deplasează cum se arată în fig. 8-1. Vom considera că electrozii sînt neatacabili (pasivi). Intr-un prim caz, să considerăm o soluție în apă de $CuCl_2$ (electrozii fiind de Pt).

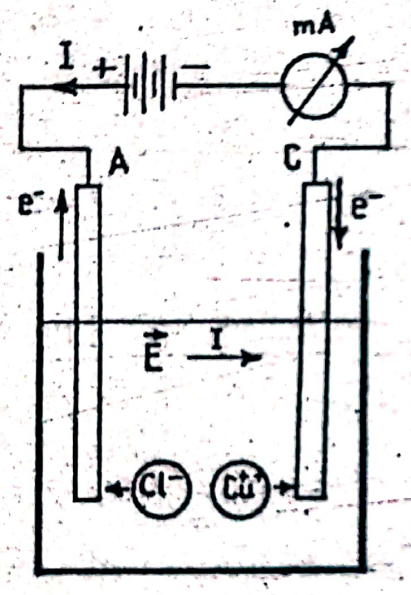


Fig.8-1

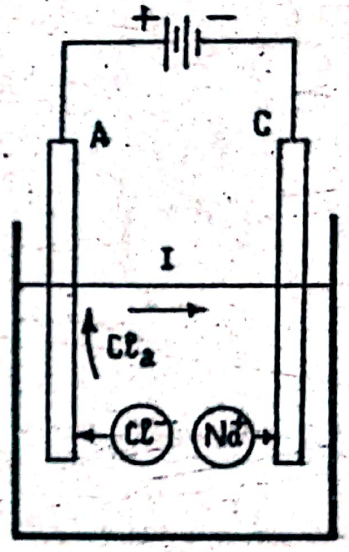


Fig.8-2

Cationii ajungînd la catod, capturează electronii care vin de la sursa de curent continuu (acumulator); iar anionii, în contact cu anodul, cedează același număr de electroni.

In acest caz se poate scrie schematic:

$$2Cl^- \longrightarrow 2Cl + 2e^- \quad \text{și} \quad Cu^{++} + 2e^- \longrightarrow Cu$$

ca rezultat, cuprul se depune pe catod, iar atomii de clor, grupîndu-se în molecule de clor (Cl_2), se degajă la anod

sub formă de gaz. De altfel halogenii şi oxigenul sînt singurii metaloizi care se pot forma la anod.

In aceleaşi condiţii (electrozi pasivi de grafit), în cazul clorurii de sodiu topite (fig. 8-2) se depune la catod sodiu metalic, iar la anod se degajă clor ca şi în primul caz.

Dacă electrolitul este $CaCl_2$ topit (electrozii fiind de asemenea pasivi), la anod se degajă clor:

$$2Cl^- \longrightarrow 2Cl + 2e^- \quad \text{şi} \quad 2Cl \longrightarrow Cl_2 \quad ;$$

iar la catod se depune calciu:

$$Ca^{++} + 2e^- \longrightarrow Cu$$

In toate cazurile asemenea cu cele descrise mai sus, mecanismul electrolizei constă în faptul că la trecerea curentului prin circuitul metalic exterior, - în care conducţia rămîne pur electronică - , în interiorul eleczrolizorului ccnducţia se datorează unui dublu transport de ioni (conducţie ionică), care sînt purtători de sarcină şi se deplasează în sensuri opuse. Ionii se descarcă numai la electrozi; anionii alimentează anodul cu electroni şi apoi se degajă (Cl_2), iar cationii se descarcă prin furnizarea unui acelaşi număr de electroni de către catod (egal cu acela care circulă prin circuitul metalic exterior) constituind un depozit metalic (Na, Cu, Ca).

Dacă numărul acestora este n şi sarcina pe care o poartă este e, atunci intensitatea curentului care parcurge circuitul este $I = \frac{q}{t} = \frac{ne}{t}$.

In general, dacă se exprimă un acid, o bază sau o sa-

re prin formulele

$$H - R \ , \ M - OH \text{ şi } M - R \ ,$$

în timpul electrolizei, la catod apare fracţiunea M (sau H) şi la anod fracţiunea R (sau OH). Fracţiunea R poate fi formată şi din hidrogen (ca în cazul acetaţilor) sau şi din metale (ca în cazul cianurilor). In cazul hidrurilor ca LiH, deoarece Li este mai electropozitiv decît hidrogenul (Li^+H^-), hidrogenul se comportă ca un metaloid.

8.2.3. Electroliza cu reacţii secundare. In cazurile cele mai frecvente de electroliză, pe lîngă fenomenul primar (reacţia chimică primară) de descompunere a electrolitului, au loc reacţii secundare (sau reacţii chimice secundare); produsele iniţiale ale electrolizei, - mai mult sau mai puţin stabile - , acţionează asupra electrozilor (în funcţie de natura acestora) şi interacţionează cu electrolitul, cu solventul sau între ele. Aceste reacţii secundare depind de temperatură, de concentraţie şi de faptul dacă compartimentele anodic şi catodic sînt sau nu separate.

De exemplu, dacă se face electroliza unei soluţii în apă de Na_2SO_4 într-un voltametru de forma celuia indicat în fig. 8-3), se obţine la catod un volum dublu de hidrogen faţă de volumul de oxigen care se obţine la anod; rezultatele sînt aceleaşi ca atunci cînd se face electroliza apei, dar se datorează reacţiilor secundare.

Sodiul depus la catod reacţionează cu apa şi în acest fel ia naştere hidrogenul:

$$2Na + 2H_2O \longrightarrow 2NaOH + H_2\uparrow ;$$

iar la anod, radicalul SO_4 , reacţionînd cu apa, produce oxigen:

$$SO_4^{--} + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2^{--}$$

Aceleaşi rezultate se obţin dacă se face electroliza unei soluţii în apă de H_2SO_4 (electrozii fiind de Pt), sau de KOH (electrozii fiind de fier) etc., datorită unor reacţii secundare.

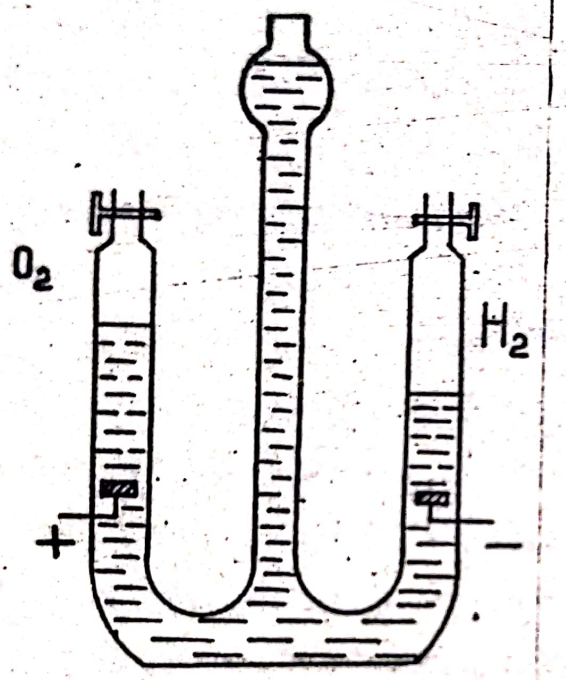


Fig. 8-3

Să considerăm acum o soluţie în apă de clorură de sodiu.

a. Presupunem că cele două compartimente sînt separate cu o diafragmă poroasă şi că electrozii sînt pasivi.

La anod se degajă clor, iar la catod se eliberează sodiul care, reacţionînd cu apa, face să se degaje hidrogen:

$$2Na + 2\ H_2O \longrightarrow 2NaOH + H_2\uparrow$$

b. Dacă cele două compartimente nu sînt separate (electrozii fiind aceiaşi)-soluţia putînd să se omogenizeze în ceea ce priveşte concentraţia - şi temperatura băii este de 20°C, se obţine o soluţie de hipoclorit de sodiu (ClO^-), iar dacă temperatura este de 50°C se obţine o soluţie de clorat

de sodiu (ClO_3^-) .

Observaţie. In unele cazuri, rezultatul global al electrolizei nu s-ar datora reacţiilor secundare, ci unor mecanisme diferite de descărcare a ionilor, în funcţie de condiţiile în care are loc electroliza. Astfel, în cazul descris mai sus (subpunctul a., se consideră că nu ionii conductori de Na^+ sînt aceia care captează electronii furnizaţi de catod, ci ionii de H^+ care provin din ionizarea destul de slabă a apei ($2H_2O \longrightarrow 2[(OH)^+ + 2H^+]$) :

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2\uparrow$$

La catod se va degaja hidrogenul, iar în compartimentul catodului se vor găsi atît ioni de Na^+ cît şi ioni de OH^-, constituind soluţia de hidrat de sodiu.

8.2.4. Electrolizorul cu anod solubil. Un caz interesant îl prezintă electroliza soluţiei unei sări care conţine un acelaşi metal din care este constituit şi anodul (NO_3Ag şi Ag etc.).

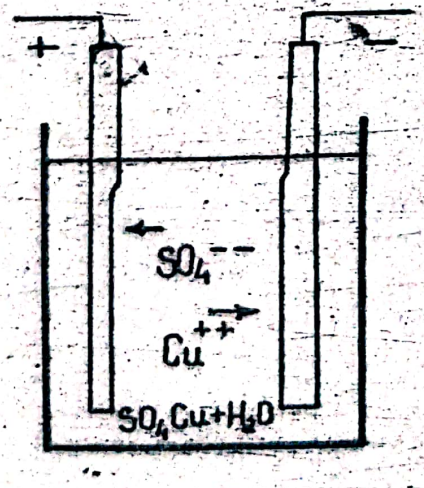


Fig.8-4

De exemplu, soluţia să fie de SO_4Cu şi anodul de Cu.

a. Dacă electrozii sînt pasivi (de Pt) , atunci la catod se depune cupru (concentraţia în ioni Cu^{++} scăzînd în jurul acestuia), iar la anod creşte concentraţia în acid sulfuric.

b. Dacă anodul este de cupru, procesul la catod nu se modifică, însă la anod metalul trece în soluţie (fig. 8-4).

Ionii de SO_4^{--}, prin descărcare, dau naştere la acid sulfuric; acesta atacă anodul, - care se "dizolvă" - , şi se formează SO_4Cu (de aceea se zice că anodul este "solubil").

Dacă concentraţia soluţiei se menţine aceeaşi în tot electrolizorul, - căci concentraţia în ioni Cu^{++} scade la catod şi creşte la anod în timp - , are loc numai un transport de metal (cupru) de la anod la catod. Acest caz de electroliză poate avea loc numai dacă acidul din care provine sarea poate ataca anodul. Genul acesta de electrolizã are importanţă aplicaţii în metalurgie (la prepararea şi purificarea metalelor şi la acoperirea unor metale cu straturi din alte metale).

8.2.5. Polarizarea electrozilor. Pentru a pune în evidenţă acest fenomen, se foloseşte o instalaţie simplă (fig.8-5).

Mărind tensiunea V aplicată unui electrolizor, constituit dintr-un vas de sticlă care conţine o soluţie în apă de acid sulfuric şi doi electrozi de platină, se obţine o caracteristică $I = f(V)$ de forma aceleia notată cu 1 în fig. 8.6.

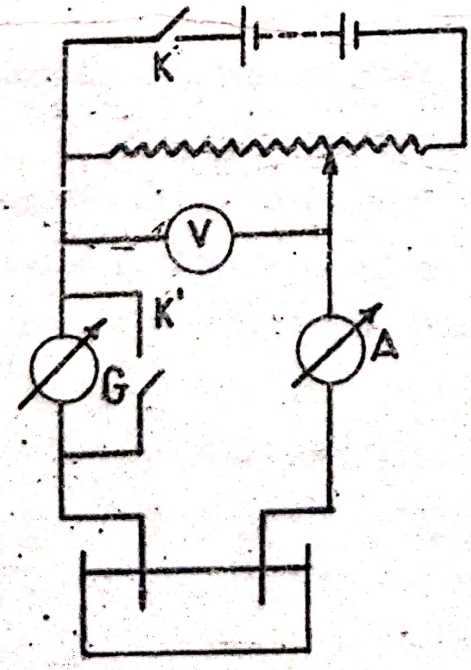


Fig. 8-5

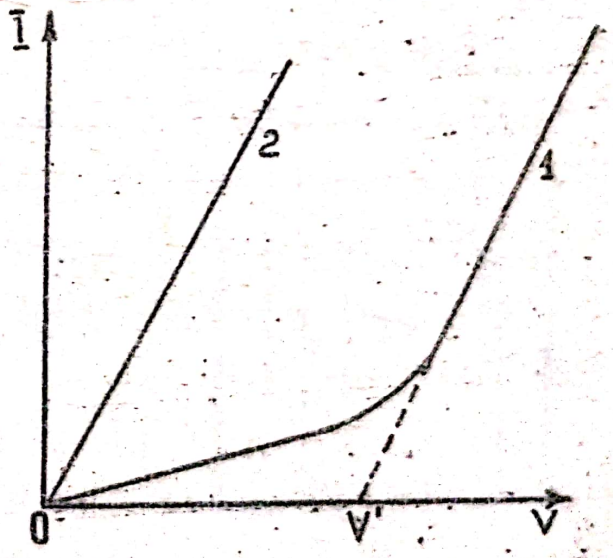


Fig. 8-6

Această curbă se prezintă astfel datorită polarizării chimice a electrozilor. Cei doi electrozi, inițial identici, se alterează la suprafață și devin diferiți, deoarece în timpul electrolizei, electrodul de Pt care constituie anodul a reținut oxigen, iar celălalt eletrod de Pt a adsorbit hidrogen. Modificarea suprafeței electrozilor de către produsele electrolizei se numește polarizare chimică a electrozilor.

Pentru că în urmă polarizării electrozii au devenit asimetrici, dacă se întrerupe legătura cu sursa de alimentare (întrerupătorul K deschis), se constată că galvanometrul G (K' deschis) indică trecerea unui curent de mică intensitate, avînd sensul contrar celui care circulă inițial; acest curent este de scurtă durată deoarece el depolarizează electrozii, restabilind simetria celulei electrolitice. Electrolizorul a devenit o sursă de curent (o pilă), caracterizată printr-o t.e.m. V' care, în timpul electrolizei, se opune tensiunii aplicate (fiind o t.c.e.m.); de aceea expresia curentului care traversează electrolizorul în timpul electrolizei este (curba 1, fig.8-6):

$$I = \frac{V - V'}{R} \qquad (8\text{-}1)$$

unde R este rezistența ohmică pe care o prezintă soluția electrolitică (6÷3).

Dacă se crește V plecînd de la valoarea zero, curentul prin electrolizor nu este nul, deoarece există o slabă tendință de depolarizare spontană a electrozilor; acel curent de intensitate mică (reprezentat prin porțiunea OV' a curbei 1 din fig. 8-6), menține polarizarea electrozilor și compensează depolarizarea acestora. Atît timp cît $V < V'$, are loc ceea ce

se numeşte [illegible] invizibilă.

Crescînd în continuare valoarea lui V, I creşte continuu, pentru ca atunci cînd $V > V'$, să aibă valoarea dată de expresia (8-1); în momentul cînd $V \approx V'$, începe electroliza vizibilă (sau normală). Dacă se măsoară, V' în condiţiuni de reversibilitate, atunci $V' = V_0$ se numeşte tensiunea de descompunere a electrolitului. Cînd electroliza are loc în alte condiţii decît cele corespunzătoare reversibilităţii, V' este diferit de V_0; diferenţa dintre cele două valori se numeşte supratensiune. Aceasta este funcţie de diversele fenomene ireversibile şi depinde de: natura electrozilor, temperatură, intensitate de curent, agitaţia soluţiei electrolitice.

O sarcină electrică Q care traversează soluţia de electrolit cînd $V > V'$, determină descompunerea acestuia şi reacţiile secundare care au loc; în acest fel, o cantitate de energie electrică, proporţională cu Q, se transformă în energie chimică. Deci un electrolizor este un receptor şi tensiunea c.e.m. a acestuia este o măsură a energiei absorbite prin fenomenul de electroliză.

T.c.e.m. de polarizare, este de ordinul voltului ($\approx 1,1$ V); aceasta depinde de natura electrozilor, de starea suprafeţei lor şi de electrolit. Astfel, dacă electrozii sînt de Pt, $V' = 1,45$ V în cazul unei soluţii de SO_4Cu şi $V' = 1,67$ V în cazul unei soluţii de H_2SO_4. Dacă soluţia este de H_2SO_4, dar electrozii sînt de Ni spongios, $V' \approx 1,4$ V.

In cazul electrolizorului cu anod solubil, datorită faptului că reacţiile secundare menţin în permanenţă simetria celulei, - deşi aceasta rămîne mereu asimetrică în ceea ce priveşte reacţia primară -, t.c.e.m. este nulă; electrolizorul se com-

portă ca o rezistenţă pasivă, deoarece transportul de metal de la anod la catod nu consumă energie chimică. In acest caz, caracteristica $I = f(V)$ este o dreaptă care trece prin originea axelor de coordonate (fig. 8-6).

8.3. Legile electrolizei (Faraday 1833)

Diverse experienţe şi teoria ionilor au permis să se enunţe şi să se explice legile electrolizei.

8.3.1. Legi calitative. a. Produsele electrolizei apar numai la suprafaţa electrozilor; compoziţia electrolitului nu se modifică decît în apropierea electrozilor.

Observaţie. Dacă electroliza durează un timp mai îndelungat, difuzia - datorită temperaturii sau agitaţiei electrolitului - conduce la o modificare a compoziţiei în toată masa electrolitului. b. In cazul electrolizei fără reacţii secundare, la catod apar elementele electropozitive (metalele sau hidrogenul acid) iar la anod restul moleculei (în mod curent, elementele electronegative). Altfel spus, prin capturarea electronilor de către cationi, la catod are loc o reducere în sensul larg al noţiunii, iar prin cedarea electronilor de către anioni, la anod are loc o oxidare.

8.3.2. Legi cantitative. a. Masa m de electrolit descompusă, sau masa m_c de metal depusă la catod prin electroliză este proporţională cu sarcina electrică care traversează cuva electrolitică:

$$m = K'Q \qquad \text{şi} \qquad m_c = KQ \tag{8-2}$$

b. Sarcina electrică necesară pentru a depune la catod un echivalent gram (valenţă-gram) de substanţă, nu depinde de e-

lectrolit şi este egală cu $\mathcal{F}$ = 96490 coulombi). $\mathcal{F}$ se numeşte <u>numărul lui Faraday</u>, sau faraday (uneori i se spune echivalent electrochimic).

Cele două legi se pot traduce prin formula:

$$\boxed{m_c = \frac{A}{n}\frac{1}{\mathcal{F}} It} \qquad (8-3)$$

în care A este masa atomică, n este valenţa metalului şi Q = It este sarcina electrică care traversează electrolitul.

Dacă ne referim la masa m , atunci se scrie formula:

$$m = \frac{M}{\ell}\frac{1}{\mathcal{F}} It \quad , \qquad (8-4)$$

unde M este masa moleculară (molară) şi ℓ este numărul de legături de valenţă rupte prin electroliză. De exemplu, în cazul soluţiilor electrolitice de NaCl, Na_2SO_4 , $CuSO_4$, $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, n are valorile: 1; 1; 2; 3 şi 3 respectiv, iar ℓ are valorile 1; 2; 2; 3 şi 6 respectiv.

$\frac{A}{n}$ este <u>echivalentul gram al metalului</u> iar $\frac{M}{\ell}$ este <u>echivalentul gram al electrolitului</u>, $K = \frac{1}{\mathcal{F}}\frac{A}{n}$ se numeşte <u>echivalentul electrochimic al metalului</u>, acesta este proporţional cu echivalentul chimic $\frac{A}{n}$ şi este numeric egal cu masa, în grame, de metal depus la catod prin traversarea electrolitului de către o sarcină electrică egală cu o unitate (Q şi $\mathcal{F}$ se exprimă în aceleaşi unităţi). In cazul argintului,

$$K = \frac{107,88}{96,5.10^6} = 1,118.10^{-3}\ g/C$$

In SI: A şi M se exprimă în kg, se utilizează noţiunea de echivalent-kilogram şi $\mathcal{F} = (96490 \pm 10)10^3$ C.

8.3.3. Sarcina elementară. Din cele expuse în paragraful precedent rezultă că $\mathcal{F}$ coulombi vor depune la catod N (numărul lui Avogadro) atomi de Ag, cîţi sînt într-un echivalent-gram de Cu, - care este bivalent - , conţine $\frac{N}{2}$ atomi, iar un echivalent-gram de Al, - care este trivalent - , conţine $\frac{N}{3}$ atomi; în ambele cazuri, echivalentul-gram va fi depus la catod tot de o sarcină electrică egală cu $\mathcal{F}$. Deci un ion poartă un număr întreg de sarcini elementare (nu fracţionar). Valoarea e a acestei sarcini elementare se va calcula după formula:

$$\boxed{\mathcal{F} = Ne} \qquad (8\text{-}5)$$

In urma unui studiu critic privind valoarea lui $\mathcal{F}$, s-a ajuns la concluzia că valoarea cea mai probabilă a acesteia este

$$\mathcal{F} = (96.490 \pm 10) \text{ coulombi} .$$

Din studiul cristalelor cu raze X , s-a obţinut unul din cele mai precise rezultate privind numărul lui Avogadro :

$$N = 6{,}023.10^{23}$$

Cu datele de mai sus, rezultă:

$$\boxed{e = (1{,}6020 \pm 0{,}0004)10^{-19} \text{ C}} \qquad (8\text{-}6)$$

8.4. Aplicaţiile electrolizei

Cele mai multe dintre aplicaţiile electrolizei ţin de domeniul electrochimiei, care se bazează pe legile lui Faraday, şi care se ocupă în special cu studiul transformărilor recipro-

cu dintre energia reacţiilor chimice şi energia electrică (şi alte procese asemenea). Aceste aplicaţii, dintre care vom enunţa cîteva, necesită operaţii delicate, trebuind să se dea multă atenţie alegerii electrolitului şi condiţiilor de lucru (tensiunea aplicată, vîscozitatea electrolitului, separarea compartimentului catodic de cel anodic, temperatura şi agitaţia mecanică).

Depuneri electrolitice. Acestea se fac din motive estetice sau cu scopul de a proteja anumite piese metalice, acoperindu-le cu alte metale cum sînt Ag (argintare), Ni (nichelare), Cr (cromare), Cd, Au, Cu, Pt etc; procesul acesta se numeşte galvanostegie. Pentru aceasta, se folosesc în special cuve electrolitice cu anod solubil.

Dacă depunerile servesc la reproducerea unor piese de artă (monede rare etc.), procesul se numeşte galvanoplastie.

Polisajul electrolitic. Acesta ţine de asemenea de galvanoplastie. Dacă anodul este solubil şi vîscozitatea soluţiei electrolitice este mare (prin dizolvarea unor substanţe convenabil alese) mediul nu este favorabil mişcărilor de convecţie (datorate diferenţelor de temperatură) şi difuziei (datorate diferenţei de concentraţie) care produc omogenizarea. In aceste condiţii, asperităţile se dizolvă mai repede decît scobiturile (adînciturile) şi se obţine un polisaj superior celui realizat pe cale mecanică. Polisajul electrolitic este folosit la înlăturarea frecărilor, în metalografie etc.

Prepararea unor metale din săruri topite. Aluminiul, în special, se obţine pe această cale, prin electroliza unui amestec topit (la aproximativ 950°C) de alumină (Al_2O_3) şi cryolit (AlF_3, $3NaF$); acesta din urmă intervine în proce-

sul de electroliză şi totodată coboară temperatura de topire a amestecului.

Pe aceeaşi cale se obţine Ca din $CaCl_2$ (la t - 800°C), magneziu din $MgCl_2.KCl.6H_2O$ (la t = 750°C), sodiu din NaOH (la 330°C), potasiu etc.

Temperatura ridicată uniformizează concentraţia băii; iar evitarea acţiunii metaloidului (Cl_2, O_2) asupra metalelor se realizează prin separarea celor două compartimente.

Rafinarea electrolitică a metalelor. Dintr-un anod solubil care conţine impurităţi, se poate obţine prin electroliză un metal depus mult mai pur, întrucît impurităţile rămîn în soluţie. Astfel se rafinează fierul, argintul şi în special cuprul care se obţine cu o puritate de 99,99% (după ce este şi recopt pentru a se elimina hidrogenul oclus).

Dacă o soluţie conţine săruri de mai multe metale, se poate face analiza electrolitică a acesteia, dacă se aplică pe rînd anumite tensiuni la cei doi electrozi; la fiecare valoare a tensiunii aplicate, se obţine un strat dintr-un anumit metal provenit de la una din săruri.

Protecţia prin oxidare anodică. Unele piese din diverse metale, pot fi acoperite, cu un strat de oxid rezistent, dacă se face ca acestea să constituie anozii unor electrolizoare conţinînd anumiţi electroliţi. Uneori aceşti oxizi pot fi coloraţi; prin asemenea procese se fabrică "bijuterii" ieftine.

Condensatori electrolitici. O celulă electrolitică constituită dintr-un anod de Al de mare puritate, ur catod din Pb şi o soluţie de borat de Na (etc.) se comportă ca un condensator; între cei doi conductori, - Al şi electrolitul - , se

formează un strat anodic izolant. Intrucît acest strat izolant de oxid are o grosime de ordinul a 10^{-4} cm şi o permitivitate relativă mare (10-12), capacitatea poate fi de cîţiva microfarazi pe centimetrul pătrat de suprafaţă a anodului. Aceşti condensatori prezintă deci avantajul de avea un volum mic; totodată au calitatea de a se reforma în urma unei clacări, întrucît pătura de oxid se reface; curentul de fugă pe care îl prezintă este însă mare (de ordinul a 10^{-5} A pe microfarad la tensiunea de serviciu).

In unele cazuri se poate utiliza în acelaşi scop, un electrod de tantal sau de niobiu; oxizii acestora prezintă atît o permitivitate cît şi o rezistenţă de izolament mai ridicată. Un asemenea dispozitiv poate servi şi ca redresor.

Contori electrolitici. Sarcina electrică, care parcurge un circuit electric, poate fi măsurată prin cîntărirea cantităţii de metal depuse la catodul unui electrolizor conectat în acel circuit de curent continuu (sau prin măsurarea volumului de gaz degajat). In acest scop, se foloseşte în special o soluţie de azotat de argint.

Etalonarea ampermetrelor. Pe baza legilor lui Faraday se poate măsura intensitatea unui curent continuu care parcurge un circuit, cîntărind masa de metal depusă la catod de către acel curent într-un interval de timp cunoscut. Un curent de intensitatea de un amper depune 1,1180 mg de Ag pe secundă, dintr-o soluţie de azotat de argint.

Reostate cu lichid. Un asemenea reostat este constituit, de exemplu, din doi electrozi de Cu (de diverse forme) introduşi într-o soluţie de sulfat de cupru; rezistenţa acestuia se variază prin modificarea lungimii sau secţiunii coloanei

de soluţie (variind distanţa dintre electrozi şi suprafaţa introdusă în soluţia electrolitică a acestora.

Cuva reografică. Aceasta este o cuvă electrolitică

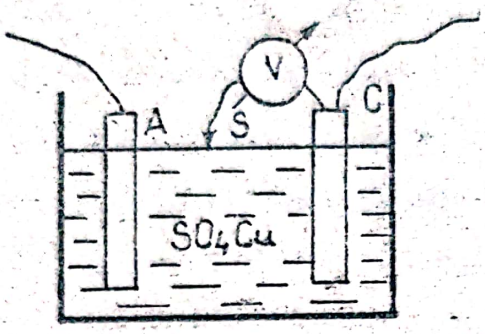


Fig. 8-7

ce serveşte la studiul cîmpurilor electrostatice şi la studiul a diverse fenomene fizice, - cum sînt unele din domeniul aerodinamicii - , care se reduc la rezolvarea unor probleme asemănătoare (fig. 8-7). Acest studiu este posibil pe baza analogiei dintre repartiţia liniilor de cîmp electrostatic şi aceea a liniilor de curent într-un conductor omogen (5.2).

Se foloseşte, de exemplu, o soluţie de sulfat de cupru; electrozilor de cupru li se dă o asemenea formă (model) încît să creeze un cîmp asemenea cu cel de studiat. O sondă, S , constituită dintr-un fir de cupru, conectată în serie cu un voltmetru apropiat la catod (sau la anod), arată forma unei linii echipotenţiale dacă prin deplasarea acesteia diferenţa de potenţial indicată de voltmetru rămîne constantă. Metoda cuvei reografice este mult folosită în studiul lămpilor electronice şi a lentilelor electrostatice.

Acumulatorii. Sînt de asemenea o aplicaţie importantă a electrolizei.

8.5. Legea lui Ohm în cazul electroliţilor

8.5.1. Definiţii şi formule. Să considerăm o coloană de soluţie de electrolit, cuprinsă între cei doi electrozi

plani (fig. 8-8), de suprafaţă S şi să delimităm din aceasta o porţiune, MM - M'N', suficient de îndepărtată de cei doi electrozi, pentru a admite că concentraţia soluţiei în ioni în

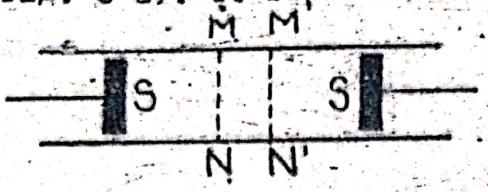


Fig.8-8

acea regiune nu variază în timp. Dacă se aplică o diferenţă de potenţial V constantă la cei doi electrozi, se poate considera, în primă aproximaţie că, cîmpul electric este uniform între cei doi electrozi şi că are valoarea $E = \frac{V}{\ell}$, ℓ fiind distanţa dintre cei doi electrozi.

Sub acţiunea cîmpului $\vec{E}$, fiecare ion este supus unei forţe constante care este proporţională cu intensitatea cîmpului electrostatic. In acelaşi timp, deoarece un ion se ciocneşte în mişcarea sa de moleculele de apă şi de alţi ioni, se poate spune că asupra ionului acţionează o forţă de frecare; această forţă de frînare este proporţională cu coeficientul de vîscozitate al soluţiei şi cu viteza ionului. Astfel, un ion capătă aproape instantaneu o viteză medie limită, care este proporţională cu intensitatea cîmpului electric:

$$\vec{v}_+ = \mu_+ \vec{E} \quad \text{şi} \quad \vec{v}_- = -\mu_- \vec{E} \qquad (8\text{-}7)$$

unde μ, - raportul dintre modulul vitezei de deplasare a ionului şi modulul cîmpului electric - , este prin definiţie mobilitatea ionului (în SI aceasta se exprimă în $\frac{m/s}{V/m}$. Viteza şi mobilitatea cationului, care se deplasează în sensul cîmpului electric, s-au notat cu indicele + , iar viteza şi mobilitatea anionului, care se deplasează în sens opus cîmpului electric, s-au notat cu indicele - .

Dacă fiecare ion poartă n sarcini elementare $\pm e$ şi într-o unitate de volum există $N\alpha$ cationi şi $N\alpha$ anioni, - N fiind numărul de molecule de electrolit pe unitatea de volum şi α fracţiunea ionizată (adică raportul dintre numărul de molecule ionizate şi numărul total de molecule de electrolit), numit grad de disociere, atunci expresiile densităţii sarcinilor mobile sînt:

$$\rho_+ = N\alpha n e \quad \text{şi} \quad \rho_- = -N\alpha n e$$

Deoarece electrolitul este neutru din punct de vedere electric, înseamnă că cele două densităţi de sarcină sînt egale în valoare absolută.

Curentul care străbate unitatea de suprafaţă perpendiculară pe direcţia lui $\vec{E}$, va avea expresia (5-5):

$$\vec{i} = \rho_+\vec{v}_+ + \rho_-\vec{v}_- = \vec{v}_+ N\alpha ne - \vec{v}_- N\alpha ne \ ;$$

sau, în funcţie de $\vec{E}$:

$$\vec{i} = (\mu_+ + \mu_-)N\alpha ne\,\vec{E} \ . \qquad (8-8)$$

Din cele de mai sus rezultă că şi în cazul electroliţilor (a conduţiei ionice) este valabilă legea lui Ohm locală, dacă $\vec{v}$ este proporţional cu modulul lui $\vec{E}$, deoarece relaţiile anterioare se pot pune sub forma

$$\vec{i} = \sigma\vec{E} \ ,$$

în care

$$\sigma = (\mu_+ + \mu_-)\, N\alpha n e \qquad (8-9)$$

este conductivitatea electrolitului.

In afara porţiunilor din jurul electrozilor, unde este necesar să se ţină seama cel puţin de t.c.e.m. de polarizare, legile macroscopice ale curentului continuu se aplică în cazul conducţiei ionice, cum se aplică în cazul conducţiei electronice.

Deoarece în expresia lui U intră numărul N de molecule de electrolit dizolvate în unitatea de volum, pentru studiul electroliţilor se introduce noţiunea de <u>conductivitate molară S</u> .

Prin definiţie,

$$\lambda = \frac{\sigma}{C} \quad , \qquad (8\text{-}10)$$

în care C este <u>concentraţia moleculară</u>, definită ca numărul de molecule gram de electrolit dizolvate în unitatea de volum de soluţie (mol pe litru). Pentru că $C = \frac{N}{\mathcal{N}}$, în care $\mathcal{N}$ este numărul lui Avogadro, şi $\mathcal{F} = e\mathcal{N}$(-) se obţine expresia:

$$\Lambda = (\mu_+ + \mu_-)\alpha n\mathcal{F} = \Lambda_+ + \Lambda_- \quad , \qquad (8\text{-}11)$$

cunoscută sub denumirea de formula lui <u>Kohlrausch</u>. Această lege de aditivitate spune că conductivitatea moleculară a unei soluţii de electrolit este egală cu suma conductivităţilor moleculare ale cationului Λ_+ şi anionului Λ_- .

In soluţiile diluate, α tinde către unitate, iar Λ tinde către <u>conductivitatea moleculară limită</u>:

$$\Lambda_0 = (\mu_+ + \mu_-)n\mathcal{F} \qquad (8\text{-}12)$$

Din cele de mai sus reiese că gradul de disociere α , la o concentraţie oarecare C are ca expresie :

$$\alpha_c = \frac{\Lambda}{\Lambda_0} \qquad (8\text{-}13)$$

Această relaţie conduce la cea mai bună metodă (mai precisă decît cea cryometrică) de determinare a gradului de disociere.

Formula (8-12) permite măsurarea directă a sumei mobilităţilor. Prin măsurarea concentraţiei soluţiei în apropierea electrozilor, se poate determina raportul μ_+ / μ_-. In consecinţă, se pot cunoaşte valorile celor două mobilităţi.

8.5.2. Determinarea conductivităţii. Dacă se măsoară rezistenţa unei coloane de soluţie de electrolit cu volum bine definit, de o anumită concentraţie, se poate determina conductivitatea electrolitului, σ. In cazul unei coloanei clindrice de lungime l şi de secţiune S se poate aplica formula cunoscută (6-25):

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} ,$$

dacă densitatea de curent nu depăşeşte o anumită valoare.

Una din dificultăţile determinării lui σ constă în a defini cu precizie secţiunea S; pentru aceasta, se construiesc celule de diverse forme care au electrozii cu suprafaţa egală cu a secţiunii drepte a coloanei de lichid (fig. 8-9).

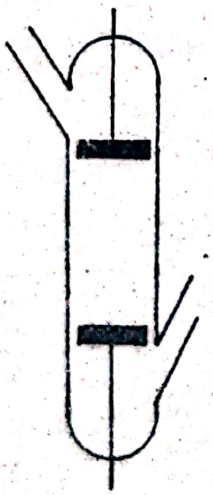


Fig.8-9

In mod curent însă, se efectuează măsurători relative, utilizînd o celulă căreia i s-a determinat constanta K cu o soluţie de KCl în apă (de exemplu), a cărei condictivitate s-a determinat prin măsurători foarte îngrijite. Această constantă se calculează după formula:

$$R = \frac{K}{\sigma} \qquad (8-14)$$

Dacă se măsoară rezistenţa R' a unei coloane de soluţie introdusă în aceeaşi celulă, se obţine:

$$\sigma' = \frac{K}{R'} = \frac{R}{R'} \qquad (8-15)$$

O altă dificultate care apare la determinarea conductivităţii (rezistivităţii) electroliţilor, provine de la fenomenul de polarizare a electrozilor. De aceea, pentru ca o cuvă electrolitică să se comporte ca o rezistenţă pasivă, trebuie ca rezistenţa acesteia să se măsoare cu o punte alimentată în c.a., - cum este puntea Kohlrausch (fig. 8-10) - , de frecvenţă cuprinsă între 300 Hz şi 4000 Hz, produs de un oscilator; polarizarea care are loc în timpul unei semiperioade este anulată în a doua jumătate a perioadei.

Pentru a pune în evidenţă trecerea c.a. prin "puntea" DC , se foloseşte un telefon (sau un instrument sensibil de c.a.). Rezistivitatea soluţiilor de electrolit se măsoară mai

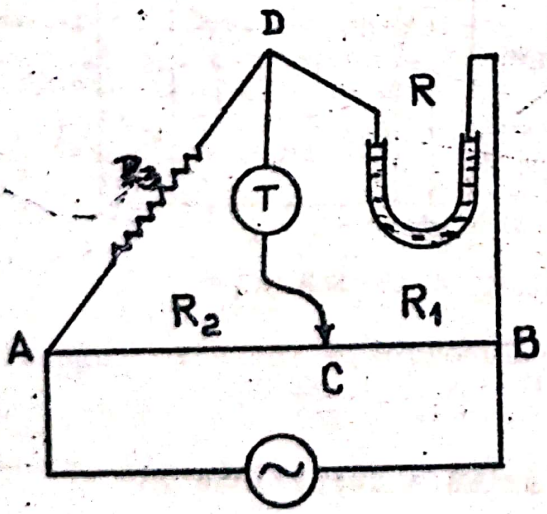


Fig. 8-10

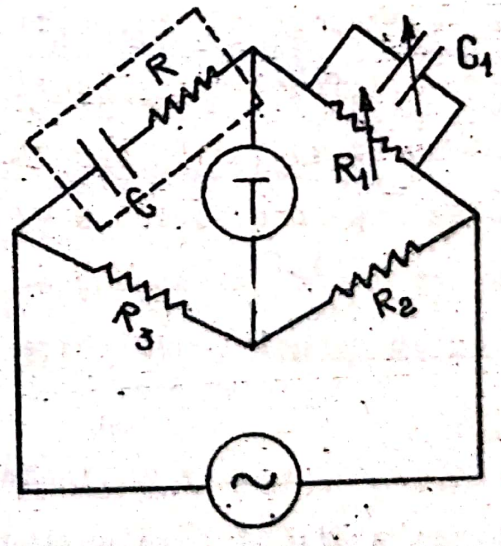


Fig. 8-11

precis cu o punte (fig. 8-11) cu care se măsoară în acelaşi

timp şi capacitatea pe care o prezintă celula electrolitică, deoarece independenţa acesteia este echivalentă cu o capacitate C în serie cu o rezistenţă R .

8. 6. Unele date privind soluţiile de electrolit

Pentru studiul proprietăţilor unei soluţii de electrolit se măsoară σ şi ε la diverse concentraţii şi dependenţa acestora de natura solventului, de temperatură, de tensiunea aplicată şi de alţi factori.

Astfel, σ creşte, iar λ scade cu creşterea concentraţiei, în cazul tuturor coluţiilor de electrolit.

Conductivitatea σ a unui electrolit anumit, la o temperatură constantă, de fapt creşte cu concentraţia şi trece printr-un maxim la o concentraţie de cîţiva moli pe litru. Acest maxim nu poate fi atins decît în cazul electroliţilor foarte solubili; de aceea, în majoritatea cazurilor se observă numai creşterea lui σ cu concentraţia.

σ depinde mult de natura electrolitului, - fără să depindă de natura electrozilor. Astfel, soluţiile de electroliţi tari au σ de ordinul cîtorva unităţi ($\Omega^{-1} m^{-1}$) cînd concentraţia este mică şi de cîteva zeci de unităţi cînd concentraţia este mare. In cazul soluţiilor de H_2SO_4, HCl, σ variază cu concentraţia, trecînd printr-un maxim de circa 70 $\Omega^{-1} m^{-1}$.

Conductivitatea creşte repede cu temperatura (mai repede decît scade la metale); la o creştere a temperaturii de la 20°C la 50°C , σ poate deveni de două ori mai mare. De aceea, la măsurarea conductivităţii electroliţilor, temperatura trebuie să fie foarte bine precizată. Variaţia mare a lui σ cu temperatura în cazul soluţiilor de electrolit, se

explică prin scăderea rapidă a coeficientului de vîscozitate a apei cu temperatura (cu circa 1/40 pe grad).

Variaţia lui σ cu temperatura se poate reprezenta printr-o formulă de forma

$$\sigma = \sigma_0[1 + a(t - t_0)] \quad , \qquad (8\text{-}16)$$

în cazul unui interval de temperatură $(t - t_0)$ moderat. Cînd solventul este apa, se alege în mod obişnuit $t_0 = 18^oC$. Constanta a nu variază ca ordin de mărime cu natura electrolitului; cînd t este cuprins între 0^oC şi 35^oC, $a \simeq 0{,}01\ grad^{-1}$ în cazul acizilor şi $a \simeq 0{,}02\ grad^{-1}$ în cazul sărurilor. In cazul sărurilor topite a are valori mai mici (0,004 - 0,007 $grad^{-1}$).

Mobilităţile ionilor, în cazul soluţiilor apoase, au valori apropiate pentru toţi ionii $(- 5\text{-}8).10^{-8}\ \frac{m/s}{V/m}$. Atît experienţele cît şi teoria simplificată a electroliţilor confirmă că mobilitatea unui ion este independentă de electrolitul din care provine. De exemplu, în unităţi SI, ionii K^+, Zn^{++}, Cl^-, SO_4^{--}, au respectiv mobilităţile 7.10^{-8}, 6.10^{-8}, 7.10^{-8} şi $8.10^{-8}\ \frac{m/s}{V/m}$, la temperatura de 25^oC şi la o concentraţie în electrolit de 0,1 kilomol/m^3. Excepţie fac ionii de H^+ şi $(OH)^-$, care, în aceleaşi condiţii precizate mai sus, au mobilităţile 34.10^{-8} şi $18.10^{-8}\ \frac{m/s}{V/m}$. De aceea, la o aceeaşi concentraţie, soluţiile de acizi tari şi de baze tari, sînt mai conductoare decît sărurile.

Mobilitatea ionilor creşte mai repede cu temperatura, din aceleaşi motive ca şi conductivitatea, fiind aproape independentă de concentraţie. Aceasta creşte (ca şi σ) cu aproximativ 2% - 3% pe grad.

Scanned with OKEN Scanner

Vitezele de deplasare ale ionilor sînt ușor observabile: dacă intensitatea cîmpului electric este de 10^{-2} V/m , viteza de deplasare a ionilor este de circa 5.10^{-3} mm/s. La această viteză de deplasare de ansamblu se adaugă, pentru fiecare ion, viteza mișcării de agitație termică (în cazul moleculelor, aceasta este de ordinul a 100 m/s).

Conductivitatea molară λ variază cu concentrația C. Dacă se consideră soluții de electrolit diluate (C < 1 mol/litru) și se studiază variația lui λ cu concentrația, se constată că toate soluțiile de electrolit se pot împărți în două grupe.

In cazul soluțiilor de acizi tari, de baze tari și al celor mai multe săruri, se constată că λ crește foarte puțin cu diluarea soluției (deja diluate). Aceasta se explică prin faptul că electrolitul este total ionizat; totodată trebuie să se țină seama și de forțele coulombiene care se exercită între ioni. De exemplu, dacă $t = 18^{o}C$, o soluție de NaCl are $\lambda = 1{,}022.10^{-2}$ cînd concentrația este de 10^{-2} mol/litru și $\lambda = 1{,}0810.10^{-2}$ cînd concentrația este de 10^{-4} mol/litru. Astfel se disting soluțiile de electroliți tari.

In cazul acizilor slabi și a bazelor slabe, λ crește foarte repede cu diluarea soluției (deja diluată); astfel , λ al unei soluții de acid acetic crește de 80 de ori, - de la $0{,}13.10^{-3}$ la $10{,}7.10^{-3}$ - , cînd concentrația scade de la 1 mol/litru la 10^{-4} mol/litru (la o aceeași variație a concentrației, λ al clorurii de sodiu nu variază decît cu 50%) . Prin aceasta se caracterizează soluțiile de electroliți slabi. Comportarea acestora se explică prin faptul că numărul de molecule ionizate este mic (iar interacțiunile dintre dintre ioni sînt neglijabile).

Conductivitatea moleculară limită λ_c (ca şi mobilitatea ionilor) depinde mult de temperatură şi de natura electrolitului. Astfel, la temperatura de 25°C, în unităţi SI, ionul H^+, - care are cea mai mare mobilitate -, are $\mu_+ = 34.10^{-8}$, $\lambda_0 = 0,0328$ şi la un cîmp electric de 100 V/m are $v_+ = 3,28.10^{-5}$ m/s.

CAP. 9. CITEVA TIPURI DE GENERATORI ELECTRICI

9.1. Lanţuri heterogene de conductori metalici

O porţiune de circuit liniar, poate fi constituită din conductori de naturi diferite; atunci acesteia i se dă denumirea de lanţ heterogen de conductori.

Studiul acestor genuri de circuite interesează în mod deosebit pentru obţinerea generatorilor electrici. In acest sens, lanţurile heterogene alcătuite din metale şi electroliţi prezintă alte comportări (9.2) decît cele constituite din conductori electronici. In cele ce urmează, ne vom ocupa numai de lanţuri heterogene constituite din conductori metalici cu acelaşi scop practic precizat mai sus. Explicaţia fenomenelor pe care le prezintă acestea, se va baza pe teoria electronică clasică.

9.1.1. Diferenţa de potenţial de contact

9.1.1.1. Lucrul de ieşire. După cum s-a spus deja, în metale există electroni care sînt liberi să se mişte în interiorul unui eşantion, ca urmare a compensării, în primă aproximaţie a forţelor ce se exercită asupra acestora din partea celorlalţi electroni (repulsie) şi din partea ionilor reţelei (atracţie). Deoarece asupra electronilor liberi nu acţionează nici o forţă, deşi aceştia poartă sarcini electrice, în-

seamnă că interiorul unui eşantion metalic este un volum echipotenţial. Pentru că, - după cum arată experienţa - , prin crearea unui cîmp electric în interiorul eşantionului, electronii liberi capătă o deplasare de ansamblu şi formează un curent electric, aceştia poartă denumirea de electroni de conducţie.

Totuşi, asupra unui anumit electron liber din interiorul unui eşantion metalic se exercită o forţă, atunci cînd acesta se află, - în mişcarea sa dezordonată - , foarte aproape de un nucleu atomic. De asemenea, cînd un electron se găseşte în apropierea suprafeţei eşantionului, acesta este iarăşi supus acţiunii unei forţe îndreptate spre interior, datorită faptului că acolo repartiţia ionilor pozitivi şi a celorlalţi electroni nu mai rămîne simetrică, aşa cum este departe de suprafaţa care limitează eşantionul. In apropierea suprafeţei care separă metalul de vid (aer) există deci un cîmp electric îndreptat spre exterior (fig. 9-1); acest cîmp există şi în vid numai în imediata apropiere a suprafeţei care îl limitează. Lucrul necesar să se furnizeze unui electron; pentru ca acesta să iasă în afara suprafeţei care limitează eşantionul, pînă la o distanţă unde viteza lui este nulă, se numeşte <u>lucru de ieşire</u> (W_s) . După acesa electronul se poate mişca din nou într-o regiune echipotenţială. Existenţa lucrului de ieşire ca şi a cîmpului electric din regiunea stratului superficial, arată că la trecerea acestuia potenţialul variază, deoarece electronul este purtător de sarcină. Cu alte cuvinte, lucrului de

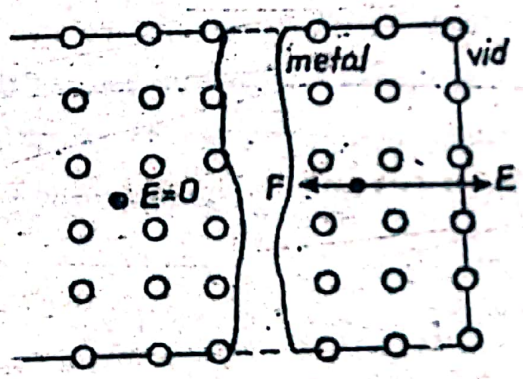


Fig.9.1.

ieşire W_s , îi corespunde un <u>potenţial de ieşire</u> V_s , între care există legătura

$$W_s = e\,V_s \qquad (9\text{-}1)$$

Atît W_s cît şi V_s sînt caracteristice fiecărui metal.

Prin convenţie, energia potenţială a unui electron în afara metalului se consideră că este nulă. Cînd se trece prin stratul de trecere, această energie scade, cu valoarea lucrului de ieşire şi în interiorul metalului energia potenţială a electronului este din nou constantă. Deoarece grosimea stratului de trecere este de ordinul a mii de distanţe atomice ($\approx 10^{-7}$ m) şi distanţa de la suprafaţa metalului pînă unde, în vid, nu mai există interacţiune între electron şi eşantionul metalic este de ordinul cîtorva grosimi ale stratului de trcere ($\approx 10^{-6}$ m), reprezentarea grafică a variaţiei energiei potenţiale a electronului în apropierea suprafeţei eşantionului, - pe distanţa d - , arată ca în fig. 9-2; se obişnuieşte să se spună că în interiorul eşantionului metalic, electronul se află într-o <u>groapă de potenţial</u>.

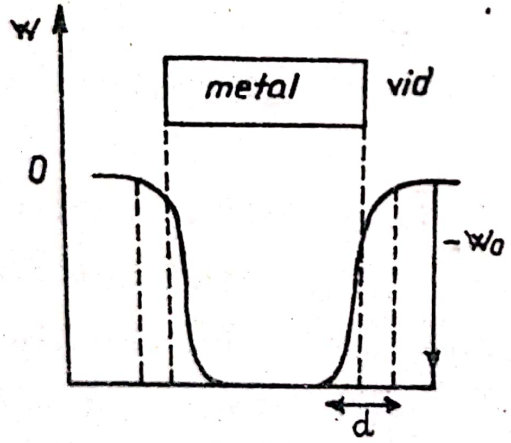


Fig. 9.2.

In realitate, energia potenţială a electronilor, în interiorul unui metal nu este constantă; datorită structurii periodice a cristalelor metalice şi energia potenţială a electronilor este de asemenea o funcţie periodică.

Fundului gropii de potenţial îi corespunde valoarea medie a energiei potenţiale.

Dacă V_o este valoarea medie a potenţialului în interiorul metalului, atunci adîncimea gropii energiei potenţiale, sau cum se mai spune, înălţimea <u>barierei de potenţial</u>, are expresia:

$$W_o = e V_o \qquad (9-2)$$

Cum potenţialul în exteriorul metalului este considerat nul (ca şi energia lui potenţială) şi pentru că sarcina electronului este negativă, rezultă că potenţialul în interiorul eşantionului metalic este pozitiv (energia potenţială a electronului fiind negativă).

Din teoria cuantică a corpului solid rezultă însă că la zero absolut energiile cinetice ale electronilor sînt cuantificate şi că nu pot fi superioare unei energii cinetice maxime numită <u>energia lui Fermi</u> (W_{Fo}), care este mai mică decît W_c ; adică la zero absolut, electronii dintr-un metal pot avea energii cinetice în gama de valori cuprinsă între zero şi W_{Fo}.

Deci, pentru a extrage un electron din metal, este necesar de furnizat electronului o energie mai mică decît W_o ; la zero absolut, această energie pentru electronii care posedă deja energia cinetică W_{Fo} , are expresia:

$$(W_S)_o = W_o - W_{Fo} \qquad (9-3)$$

şi reprezintă tocmai <u>lucrul de ieşire</u> sau <u>lucrul de extracţie din metal</u>. Dar numai cînd electronul are o energie cinetică mai mare decît W_o , acesta poate părăsi eşantionul metalic. De exemplu, în cazul Wolframului, W_o = 13,47 eV şi W_{Fo} = 8,95 eV;

rezultă deci că $(W_S)_o = 4,52$ eV. In general, lucrul de ieşire al metalelor este de ordinul cîtorva electrovolţi. Astfel, energia de agitaţie termică estimată prin produsul KT , nu este suficientă ca la temperatura camerei să furnizeze electronului o energie cinetică ($\frac{1}{2} mv^2$) suficientă pentru extracţia lui:

$$KT = 1,38.10^{-23}.300 = 4,15.10^{-21} J = 0,026 \text{ eV}.$$

Odată cu creşterea temperaturii metalului, energia lui Fermi scade foarte puţin (cînd T creşte de la 0 K la 300 K , $\Delta W_F \approx 10^{-4}$ eV), însă în acelaşi timp creşte energia medie a electronilor şi ca rezultat, cînd temperatura metalului creşte, numărul electronilor care ies din metal creşte de asemenea. Deci şi lucrul de ieşire variază cu temperatura.

9.1.1.2. Efectul Volta. A. Volta, 1796, pune în evidenţă electrizarea reciprocă a doi conductori metalici numai la simpla atingere dintre ei; unul din conductori se electrizează pozitiv, iar celălalt negativ.

Dacă de tija unui electroscop se fixează un disc de Zn care este acoperit cu un strat foarte subţire de dielectric şi peste acesta se aşează un disc de Cu, după ce se ating cu un conductor de cupru, - menţinut cu un mîner izolant, - ambele discuri simultan şi apoi se îndepărtează conductorul, foiţele electroscopului nu indică nici o deviaţie (fig. 9-3).

Prin ridicarea discului de cupru la o distanţă oarecare, foiţele electroscopul diverg (fig. 9-4).

Această experienţă, de genul celora efectuate de Volta, pune în evidenţă electrizarea reciprocă a doi conductori metalici, numai prin simpla atingere a unuia de celălalt. Cînd

discurile sînt apropiate unul de altul, condensatorul pe ca-

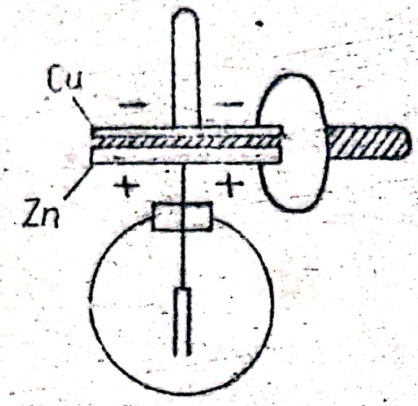


Fig.9.3.

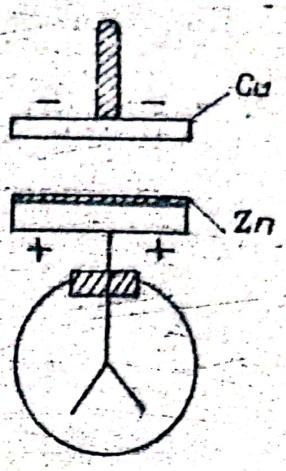


Fig. 9.4.

re îl realizează, - fiind separate de stratul de dielectric -, are o capacitate atît de mare încît diferenţa de potenţial de la armături este prea mică pentru ca foiţele electroscopului să devieze. Prin mărirea distanţei dintre armături, capacitatea sistemului scade şi diferenţa de potenţial devine suficient de mare pentru ca foiţele electroscopului să se depărteze una de alta.

Deci, cînd două piese de metal sînt puse în contact, între acestea apare o aşa numită <u>diferenţă de potenţial de contact</u>, sau <u>tensiune Volta</u>.

Pentru a vedea de ce apare diferenţa de potenţial de contact sau <u>tensiunea de contact</u>, să ne referim la un ansamblu de doi cilindri metalici A şi B , omogeni şi la aceeaşi temperatură, ale căror baze - foarte curate şi bine şlefuite - sînt în contact perfect (fig. 9-5).

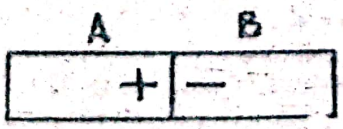


Fig.9.5

Dacă presupunem că lucrul de ieşire W_{SB} corespunzător metalului B este superior lui W_{SA} corespunzător metalului A , a-

tunci are loc un fenomen de difuzie a electronilor din metalul A spre B - şi în consecinţă A devine pozitiv faţă de B , deşi întregul ansamblu rămîne echipotenţial. Fenomenul de difuzie are loc un timp foarte scurt, datorită valorii mari a vitezei termice a electronilor, pînă cînd se stabileşte un echilibru determinat de apariţia unei diferenţe de potenţial de contact (deci şi a unui cîmp electric),-localizată într-un strat subţire conţinînd suprafaţa de contact - , care compensează efectul difuziei. In aceasta constă efectul Volta.

Tensiunea de contact $V_A - V_B$ este cu atît mai mare, cu cît este mai mare diferenţa dintre potenţialele de ieşire ale celor două metale:

$$V_A - V_B = \frac{W_{SB} - W_{SA}}{e} = V_{SB} - V_{SA} \qquad (9-4)$$

Simbolul acestei tensiuni are adesea forma $(A/B)_o$, unde A reprezintă metalul cu potenţial de ieşire mai coborît, iar indicele o arată că lanţul nu este parcurs de curent.

Cînd cei doi conductori alcătuiesc un circuit închis (fig. 9-6),natura fenomenului permite ca să se scrie:

$$(A/B)_o = - (B/A)_o$$

şi să se tragă concluzia că în acest caz suma tensiunilor de contact este nulă: $(A/B)_o + (B/A)_o = 0$.

Dacă circuitul este constituit din trei metale omogene (fig. 9-7) toate la aceeaşi temperatură, ţinînd seama de faptul că

$$V_A - V_B = (A/B)_o \quad , \quad V_B - V_C = (B/C)_o$$

şi

$$V_C - V_A = (C/A)_o \ ,$$

rezultatul de mai sus se generalizează scriind:

$$(A/B)_o + (B/C)_o + (C/A)_o = 0 \qquad (9-5)$$

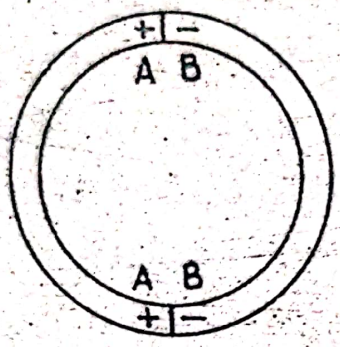


Fig. 9.6.

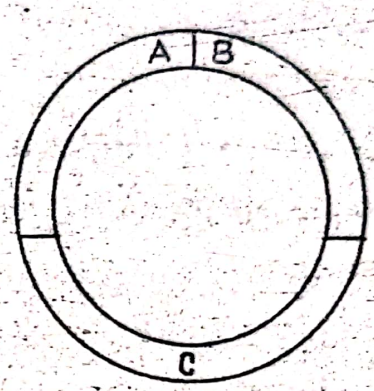


Fig. 9.7.

Această relaţie reprezintă <u>legea lui Volta</u>, sau <u>legea lanţurilor metalice pentru efectul Volta</u> şi arată că lanţul metalic este în echilibru electrostatic, fără ca potenţialul fiecărui metal în parte să fie acelaşi. Legea lui Volta se poate verifica experimental introducînd într-un asemenea circuit şi cadrul unui galvanometru de mare sensibilitate.

Dacă se deschide lanţul după cum arată fig. 9-8 a, diferenţa de potenţial între metalele extreme (A şi B) este aceeaşi ca şi în absenţa metalelor intermediare (C, ... etc.); iar dacă se deschide după cum arată fig. 9-8 b, potenţialele metalelor extreme au aceeaşi valoare.

Tensiunea de contact este determinată numai de metalele care conţin extremităţile lanţului.

Tensiunea Volta fiind statică, este dificil de măsurat;

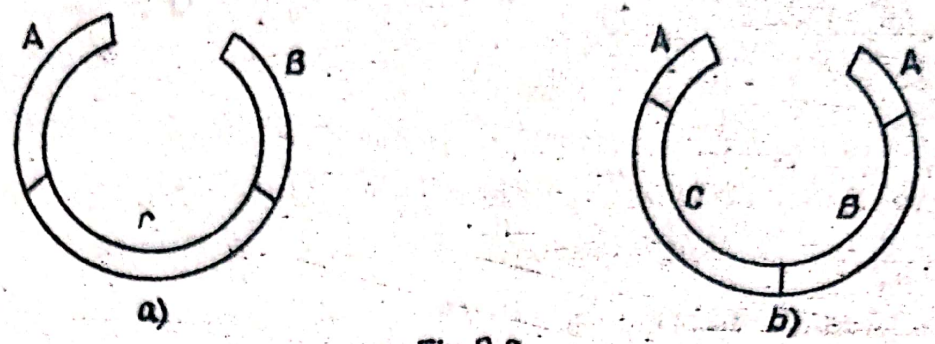


Fig. 9.8.

pentru a obţine rezultate bune, este necesar ca suprafeţele metalelor să fie curate şi să nu fie oxidate. Schiţa unei instalaţii de măsurare a acesteia se vede în fig. 9-9. O placă de Zn este fixă, iar deasupra poate să oscileze, la distanţe de ordinul zecimilor de milimetru, o placă de Cu.

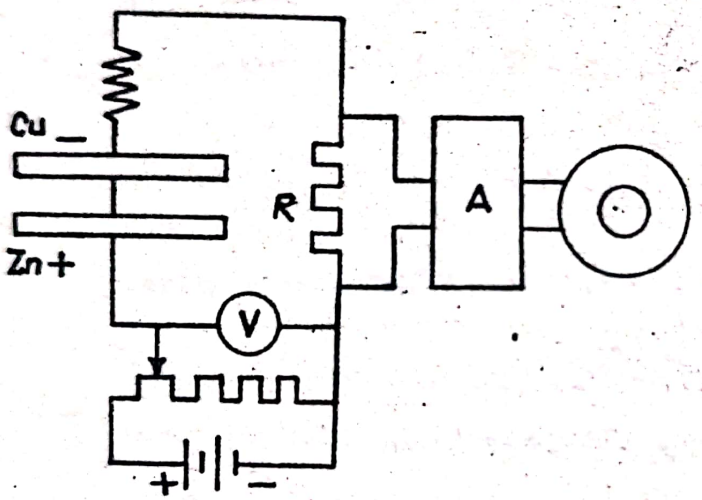


Fig. 9.9.

Tensiunea alternativă care ia naştere, - cu frecvenţa de ordinul zecilor de Hertz - , amplificată cu amplificatorul A , este pusă în evidenţă de oscilograful O . Cu ajutorul unui compensator, se poate regla tensiunea indicată de voltmetrul V astfel ca oscilograful să nu mai sesizeze existenţa tensiunii alternative. In acel moment, voltmetrul arată valoarea tensiunii de contact, care variază de la zecimi de volt la cîţiva volţi. In exemplul ales, $W_{sZn} = 3,74$ V, iar $W_{sCu} = 4,47$ V; zincul se electrizează pozitiv, cuprul se electrizează negativ şi tensiunea de contact este de ordi-

nul voltului (0,75 V).

Pentru ca această tensiune să apară în cazul metalelor, este suficient să treacă electroni, - dintr-un metal în celălat - , numai dintr-un strat superficial cu grosimea de ordinul a 10^{-9} m; deci sarcinile care apar la suprafaţa de contact a două metale sînt localizate în pături, - de o parte şi de alta a acestei suprafeţe - , cu grosimea de $\approx 10^{-9}$ m.

Tensiunea de contact apare nu numai în cazul metalelor, ci şi în cazul semiconductorilor sau între un metal şi un electrolit (lichid) etc.

In cazul a doi semiconductori, deoarece concentraţia ionilor mobili din interiorul lor este mult mai mică decît în cazul metalelor, la apariţia efectului Volta participă electroni dintr-un strat mult mai gros (de ordinul a $10^{-7} - 10^{-6}$ m). In cazul dielectricilor, - mai ales în acela al dielectricilor amorfi- ,fenomenul de electrizare prin contact este mai puţin bine cunoscut, deoarece nivelele de energie ale electronilor nu sînt bine definite. In cazul lor se presupune că iau parte la apariţia tensiunii de contact, numai electronii din imediata vecinătate a suprafeţelor de contact. Electrizarea acestor suprafeţe este caracterizată de aşa numita <u>constantă de timp a sarcinii transferate</u> (sau constanta de timp de relaxare a sarcinii), a celor doi izolanţi $\tau_1 = \varepsilon_1 \rho_1$ şi $\tau_2 = \varepsilon_2 \rho_2$ în care ε şi ρ reprezintă constanta dielectrică şi rezistivitatea.

9.1.2. <u>Efecte termoelectrice</u>. Aceste efecte apar în cazul lanţurilor care prezintă heterogeneităţi, constituite din metale (pure sau aliaje), semiconductori, săruri şi soluţii electrolitice; în continuare ne vom ocupa numai de cazul metalelor.

Scanned with OKEN Scanner

9.1.2.1. Efectul Peltier. In 1834, J.C. Peltier descoperă că la contactele unui lanţ heterogen de conductori se degajă sau se absoarbe căldură, atunci cînd este parcurs de un curent datorită unei cauze exterioare şi că această căldură este proporţională cu intensitatea I a curentului (fig. 9-10):

$$dQ_{\Pi} = \pm \Pi_I \, dt \qquad (9\text{-}6)$$

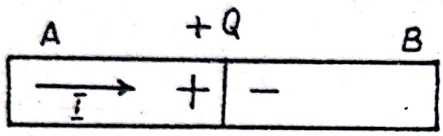


Fig. 9.10.

In relaţia (9-6), t este timpul, iar Π se numeşte tensiunea electromotoare Peltier (sau coeficient Peltier); Π depinde de natura metalelor în contact şi de temperatura uniformă la care se găseşte tot sistemul.

Efectul Peltier se pune în evidenţă printr-o experienţă clasică, montată după cum se arată în figura 9-11. In fie-

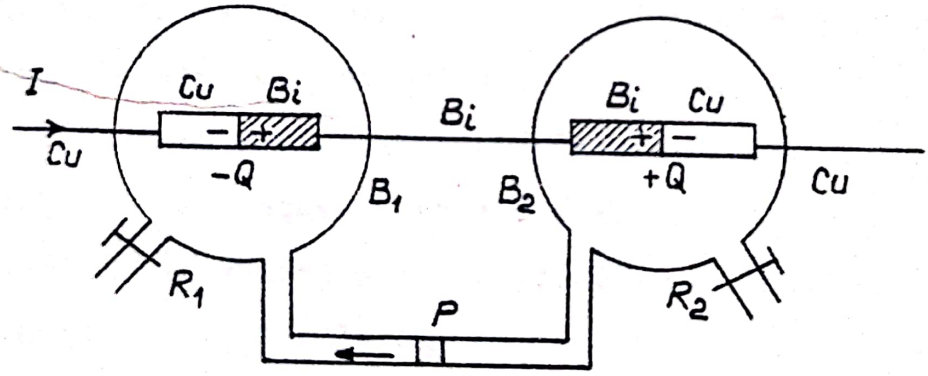


Fig. 9.11.

care balon se găseşte un sistem de două tije din cupru şi bismut sudate. Presiunea în cele două baloane se menţine aceeaşi cu ajutorul robinetelor R_1 şi R_2. Tubul de legătură T, menţinut orizontal, are la mijloc un indice de mercur P. Cînd se trece curent electric prin sistemul de conductori metalici, în sensul indicat pe figură, indicele P se deplasează spre

stînga. Aceasta arată că în balonul B_1 gazul (aerul) s-a răcit, iar în B_2 s-a încălzit. Cu alte cuvinte, la sudura Cu-Bi s-a absorbit căldură (-Q), iar la sudura Bi-Cu s-a degajat (+Q). Dacă se inversează sensul curentului, indicele P se deplasează spre B_2; în acest caz fenomenele au loc în sens invers. Această experienţă arată că, dacă valorile lui I şi t se menţin constante,

$$|+ Q_{\Pi}| = |- Q_{\Pi}| .$$

Printr-o altă experienţă, măsurînd cu ajutorul a două calorimetre căldura Q_1 degajată de unul din contacte şi căldura Q_2 absorbită la contactul al doilea, se poate măsura Q_{Π}. Ţinînd seama şi de efectul Joule, se poate scrie:

$$\begin{aligned} Q_1 &= RI^2t + Q_{\Pi} \\ Q_2 &= RI^2t - Q_{\Pi} \end{aligned} \qquad \text{şi} \quad Q_1 - Q_2 = 2Q_{\Pi}$$

Măsurînd totodată factorii I şi t, se poate determina .

Experienţele descrise arată că efectul Peltier este reversibil şi pun în evidenţă existenţa unei tensiuni $\Pi = V_A - V_B$ (fig. 9-10), care există între două puncte aflate în cele două metale în vecinătatea suprafeţei de contact.

In experienţele efectuate pentru studiul efectului Peltier este necesar să se ţină seama de efectul Joule, care este un efect ireversibil; acesta depinde de rezistenţa circuitului, variază cu pătratul intensităţii curentului şi nu depinde de sensul acestuia, degajîndu-se în toate cazurile. Căldura Peltier este proporţională cu intensitatea curentului, depinde de sensul acestuia, putînd fi degajată sau absorbită şi nu depinde de rezistenţa circuitului. De aceea experienţele se

conduc la curenţi de mică intensitate, - cînd Q_j este neglijabil şi Q_Π este important, - şi folosind conductori groşi de mică rezistenţă electrică. Din măsurători, rezultă că Π este de ordinul a $10^{-2} \div 10^{-3}$ volţi(în cazul contactului Bi-Cu, Π = 21 mV şi Bi este la potenţial mai ridicat).

Efectul Peltier, ca şi celelalte efecte termoelectrice, se explică după teoria electronică a metalelor, prin termodifuzia electronilor. La degajarea sau absorbţia de căldură, intervin două procese importante care produc efecte termice de sens opus: electronii care constituie curentul I suferă influenţa tensiunii de contact şi totodată influenţa faptului că în jurul contactului, aceştia străbat regiuni a căror concentraţie în electroni este diferită. In consecinţă, Q_Π nu se poate exprima prin tensiunea e.m. de contact $(A/B)_c$, ci prin o altă tensiune, numită t.e.m. Peltier. In mod obişnuit, tensiunea e.m. Peltier se notează prin simbolul

$$(A/B)_T = \Pi = V_A - V_B \quad , \qquad (9\text{-}7)$$

indicele T menţionînd faptul că Π depinde mult de temperatura T a contactului, datorită naturii fenomenului.

Cînd sensul curentului I este de la A la B (fig. 9-10) şi $V_A > V_B$, atunci curentul suferă o cădere de potenţial bruscă, încît regiunea de contact se comportă ca un receptor care transformă energia electrică în căldură prin alt mecanism decît efectul Joule; forţa contra-electromotoare a acestui receptor este $V_A - V_B$. Dacă sensul lui I este de la B spre A, şi $V_B < V_A$, regiunea suprafeţei de contact se comportă ca un generator de t.e.m. $V_A - V_B$ care absoarbe energie din exterior şi conductorul se răceşte; în ambele ca-

Scanned with OKEN Scanner

zuri energia disipată sau cea absorbită are expresia $(V_A-V_B)It$.

Intrucît efectul Peltier este reversibil, rezultă că într-un circuit închis care conţine două sau mai multe contacte, suma t.e.m. Peltier este nulă. Deci şi pentru acest efect se poate obţine legea lanţurilor metalice:

$$(A/B)_T + (B/C)_T + (C/A)_T = 0 \quad , \qquad (9\text{-}8)$$

care spune că un circuit nu poate fi parcurs de curent datorită numai t.e.m. Peltier, ceea ce este în acord cu principiul al II-lea al termodinamicii.

In cazul efectului Peltier, întregul sistem se află la aceeaşi temperatură; ori, principiul al II-lea al termodinamicii spune că un sistem nu poate furniza energie mecanică în exterior dacă nu conţine două izvoare de căldură cu temperaturi diferite.

Efectul Peltier se poate folosi în practică la construirea de refrigeratoare. Randamentul în cazul circuitelor metalice heterogene este mult mai mic decît în cazul circuitelor constituite din semiconductori, care prezintă un efect Peltier mai intens şi răi conducători de căldură. Se montează în serie mai multe perechi de semiconductori (în general seleniuri şi telururi şi de bosmut şi stibiu - Bi_2Te_3 etc.) unul de tip p şi altul de tip n pe o placă (fig. 9-12). Menţinînd seria de suduri care se încălzesc prin efectul Peltier la temperatura ambiantă, cu ajutorul unor tuburi prin care circulă apă, la

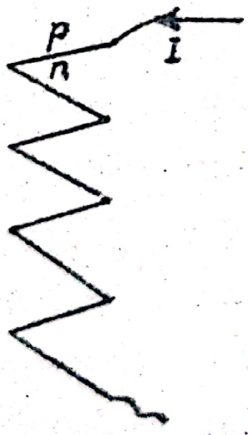


Fig. 9.12.

cealaltă serie de suduri se realizează temperaturi care permit obţinerea gheţei.

9,1.2.2. Efectul Thomson. In 1856, W. Thomson, încercînd să explice fenomenele termoelectrice cunoscute la acea vreme, arată teoretic şi apoi experimental că, dacă un conductor metalic omogen avînd temperatura neuniformă este traversat de un curent electric, pe lîngă căldura Joule (Q_J) are loc o degajare (sau ao absorbţie) suplimentară care depinde de gradientul de temperatură şi de intensitatea curentului .

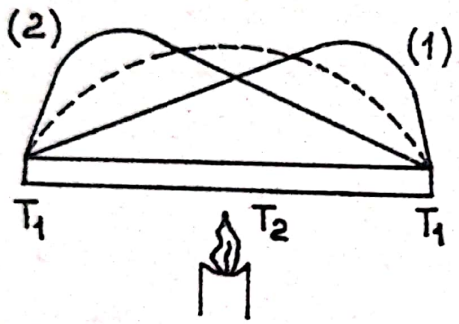


Fig. 9-13

Dacă o vergea de metal (pur sau aliaj) este încălzită la mijloc, distribuţia temperaturii (măsurată şi cu un termocuplu) de-a lungul acesteia este simetrică, Făcînd să treacă un curent prin conductor, distribuţia temperaturii are loc după o altă curbă - (1) sau (2) din fig. 9-13. Curba (1) arată o degajare de căldură datorită curentului (în afara căldurii Joule), cînd sensul acestuia coincide cu sensul temperaturilor descrescătoare (T_2 T_1); se ştie, în acest caz, că metalul,- cum se comportă cuprul în domeniul temperaturilor de 0°C - 400°C aproximativ - , prezintă un efect Thomson pozitiv. Curba (2) corespunde unui metal cu efect Thomson negativ, cum se comportă fierul în acelaşi domeniu de temperaturi.

Experienţele arată că metalele Bi, Zn prezintă un efct Thomson pozitiv, iar metalele Fe, Pt, Sb, prezintă un efect negativ.

Efectul Thomson poate fi pus în evidenţă, calitativ, printr-o experienţă efectuată cu ajutorul unui dispozitiv indicat principial în fig.9-14. Prin firul de platină ABA' cu diametrul de 0,5 mm, se trece un curent electric în sensul arătat pe figură, pînă cînd părţile superioare ale ramurilor AB şi A'B devin incandescente. Capetele inferioare ale ramurilor se găsesc la o temperatură mai scăzută, pentru că sînt introduse într-o cuvă de mercur (C). Se constată că ramura A'B, prin care curentul circulă în sensul temperaturilor crescătoare, este incandescentă pe o porţiune mai lungă decît ramura AB datorită efectului Thmonson, care este negativ în cazul platinei.

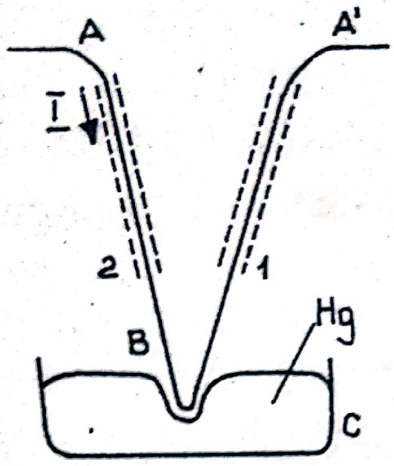


Fig. 9.14.

Efectul Thomson poate fi explicat plecînd de la consideraţia, făcută de Thomson, că un conductor metalic, omogen a cărui temperatură este neuniformă, poate fi privit ca fiind constituit din metale de natură diferită. Această neomogenitate se datorează în primul rînd faptului că vitezele termice ale electronilor diferă de la un punct la altul al metalului, fiind mai mari acolo unde temperatura este mai ridicată.

In consecinţă, între două puncte oarecare ale conductorului metalic, care nu sînt la aceeaşi temperatură, există o diferenţă de potenţial analoagă cu t.e.m. Volta, deşi potenţialul întregului conductor nu este uniform, acesta se află în echilibru electrostatic.

Cînd conductorul metalic omogen încălzit neuniform este

parcurs de un curent electric datorită unei cauze exterioare, electronii care constituie curentul suferă acţiuni asemănătoare cu cele descrise în paragraful precedent (9.1.2.1.). Ca urmare, între două puncte oarecare aflate la distanţa $d\ell$ unul de altul, a căror temperatură diferă cu dT, apare o tensiune electromotoare de temperatură a cărei expresie este:

$$d e = h\, dT \qquad (9\text{-}9)$$

unde h reprezintă tensiunea electromotoare Thomson (sau coeficientul lui Thmoson). T.e.m. Thomson este deci t.e.m. de temperatură care apare între două puncte ale conductorului avînd temperaturi ce diferă între ele cu $1^{o}C$ şi se măsoară în volt/grad.

T.e.m. Thomson se consideră pozitivă dacă potenţialul creşte în acelaşi sens cu temperatura, - cum are loc în cazul cuprului şi negativă în cazul contrar (cazul platinei).

Experienţele pentru măsurarea lui h sînt foarte dificile, căci nu se pot folosi calorimetrele; în general se face uz de cuplurile termoelectrice.

Din măsurători rezultă că acest efect, ca şi efectul Peltier, este total reversibil: căldura care intră în joc în cadrul lui, se degajă sau se absoarbe în funcţie de sensul curentului şi de sensul fluxului de căldură determinat de gradientul de temperatură $dT/d\ell$ şi este aceeaşi dacă factorii de care depinde nu-şi schimbă valorile. Ordinul de mărime a lui h este de cîţiva microvolţi pe grad (în cazul Bi este 10^{-5} V/grad) şi depinde de metal şi de temperatură (variind cu aceasta mai puţin decît efectul Peltier); h îşi poate schimba şi semnul, în funcţie de temperatură (cum se petrece în cazul fierului).

Căldura degajată sau absorbită în timpul dt prin efect Thomson de elementul $d\ell$, cînd gradientul de temperatură ($\overrightarrow{\text{grad}\, T}.\overrightarrow{d\ell} = dT$) şi curentul I au aceeaşi direcţie, se poate exprima prin egalitatea:

$$dQ = \pm h\, dT\, I\, dt = \pm d\ell\ I\, dt \qquad (9\text{-}10)$$

Deoarece efectul Thomson este reversibil, rezultă că t.e.m. de temperaţură nu conduce la apariţia vreunui curent într-un circuit închis constituit din acelaşi metal, adică:

$$\oint h\, dT = 0 \qquad (9\text{-}11)$$

Această relaţie exprimă legea lui Magnus (1851); într-un circuit închis constituit dintr-un singur metal, t.e.m. datorită oricărei distribuţii a temperaturii în conductor este nulă.

Referitor la două puncte din conductor ale căror temperaturi sînt T_1 şi T_2, relaţia (9-11) se mai poate scrie:

$$\int_{T_1}^{T_2} h\, dT + \int_{T_2}^{T_1} h\, dT = 0 \quad ,$$

de unde rezultă expresia t.e.m. de temperatură între două puncte aflate la temperaturile T_1 şi T_2 :

$$e_{12} = \int_{T_1}^{T_2} h\, dT \qquad (9\text{-}12)$$

T.e.m. de temperatură, în cazul unui acelaşi metal, depinde numai de T_1 şi T_2.

9.1.2.3. Efectul Seebeck. a. Legi. In 1823, A. Seebeck descoperă că un circuit constituit din doi conductori metalici este parcurs de curent, fără intervenţia unui generator exterior, dacă joncţiunile (contactele) dintre cele două metale (realizate prin sudură, lipire cu un metal sau prin răsucire) sînt la temperaturi diferite (fig. 9-15).

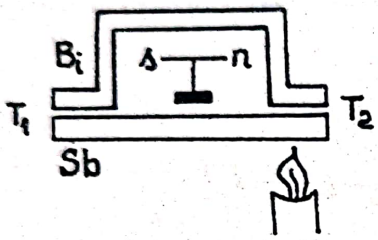


Fig. 9.15.

In general, un circuit închis constituit dintr-un singur fir de metal omogen aflat la o temperatură neuniformă, sau din fire de metal diferite aflate la aceeaşi temperatură, nu este parcurs de un curent electric. Cînd asemenea circuite sînt parcurse de curent datorită unui generator exterior, are loc o degajare (sau absorbţie) de căldură suplimentară, pe lîngă căldura Joule (efectele Thomson şi Peltier).

Insă un lanţ (circuit)închis, heterogen şi totodată la temperatură neuniformă, - cum este circuitul lui Seebeck - , poate fi sediul unui curent electric, fără să conţină vreun generator, deoarece în acest caz suma tensiunilor e.m. Peltier şi Thomson care apar în circuit nu este nulă.

Un sistem (lanţ) constituit din două fire metalice A şi B , ale căror contacte (sau suduri) sînt la temperaturi T_1 şi T_2 diferite, se numeşte cuplu termoelectric (sau termocuplu).

Deoarece ansamblul descris mai sus, transformă direct energia termică în energie electrică, se numeşte şi pilă termoelectrică sau termopilă (fig. 9-16).

Prin însumarea t.e.m. Peltier şi Thomson care iau naştere în circuit, apare o t.e.m. integrală, numită <u>tensiune electromotoare termoelectrică</u> (t.e.m.t.) $E_{T_1}^{T_2}(A,B)$; notaţia utilizată precizează natura metalelor şi temperaturile celor două contacte, cald (C - T_2) şi rece (R - T_1).

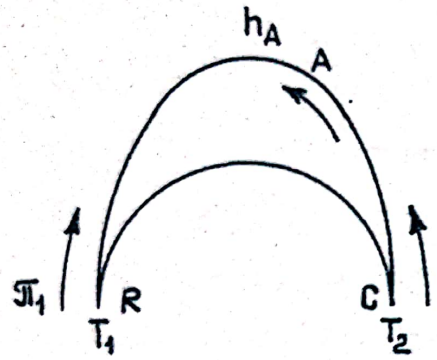


Fig.9.16.

Pentru a evalua t.e.m.t. $E_{T_1}^{T_2}(A,B)$ a termocuplului descris mai sus, se utilizează notaţiile precizate în paragrafele anterioare şi se parcurge circuitul în sensul indicat de săgeată. Astfel, referitor contactele cald şi rece, precum şi la porţiunile de circuit T_2AT_1 şi T_1BT_2, se poate scrie:

$$\Pi_2 = (A/B)_{T_2} \quad , \quad \Pi_1 = (B/A)_{T_1} \quad ,$$

$$e_{2,1} = \int_{T_2}^{T_1} h_A dT \quad , \quad e_{1,2} = \int_{T_1}^{T_2} h_B dT$$

Prin însumare se obţine:

$$E_{T_1}^{T_2}(A,B) = (A/B)_{T_2} - (A/B)_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_B - h_A)dT \qquad (9\text{-}13)$$

Semnele tensiunilor e.m. Thomson se iau în acord cu precizările făcute anterior (9.1.2.2).

Relaţia (9-13) exprimă matematic legea lui E.Becquerel (1823): t.e.m.t. a unui anumit termocuplu, nu depinde de distribuţia temperaturii de-a lungul conductorilor, ci numai de temperaturile contactelor.

Dacă ecuaţia (9-13) se înmulţeşte cu q, - sarcina electrică ce străbate termocuplul într-un interval de timp oarecare - , termenii pozitivi din membrul drept al acesteia vor reprezenta căldura absorbită prin efectele Peltier şi Thomson (neglijînd efectul Joule), iar cei cu semn negativ căldura cedată.

Pentru a măsura t.e.m. termoelectrică, trebuie introdus un instrument de măsurat (un galvanometru) în circuit. In acest fel se realizează un lanţ heterogen constituit din trei conductori metalici (fig. 9-17). In cazul cînd conductorul al treilea, C , (cadrul galvanometrului), are aceeaşi temperatură T ca şi punctele unuia dintre conductorii activi (A) între care se intercalează, procedînd ca mai înainte - , expresia t.e.m.t. din circuit este:

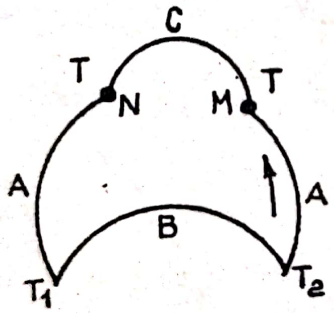


Fig. 9.17.

$$E_{T_1}^{T_2}(A,B,C)=(A/B)_{T_2}+\int_{T_2}^{T} h_A dT +$$

$$+(C/A)_T+\int_{T}^{T} h_C dt+(A/C)_T+\int_{T}^{T_1} h_A dT+$$

$$+ (B/A)_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} h_B dT ,$$

sau:

$$E_{T_1}^{T_2}(A,B,C) = (A/B)_{T_2} - (A/B)_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_B - h_A)dT \qquad (9\text{-}14)$$

deoarece termenii 3 şi 5 din membrul drept al egalităţii se reduc, iar termenul 4 este nul.

Din relaţiile (9-13),(9-14) rezultă că $E_{T_1}^{T_2}(A,B) = E_{T_1}^{T_2}(A,B,C)$ în condiţiile precizate mai sus. Adică, t.e.m. termoelectrică a unui termocuplu constituit din două fire de metale A şi B diferite, ale cărui contacte sînt la temperaturile T_1 şi T_2 nu se modifică dacă se introduce în circuit un al treilea conductor, C, care are aceeaşi temperatură T ca şi punctele (M,N) ale conductorului activ (A) cu care vin în contact; în acest fel s-a enunţat legea <u>metalelor intermediare</u>. In acord cu această lege, se poate nu numai conecta un aparat în circuitul unui termocuplu fără a modifica ~~fără a modifica~~ t.e.m.t. a acestuia, ci şi contactul cald se poate efectua prin intermediul unui al treilea metal (lipire cu argint, cositor etc.), Se pot conecta şi mai multe aparate (mai mulţi conductori), cu condiţia ca ansamblul pe care îl formează acestea să aibă în întregime aceeaşi temperatură.

Aplicînd relaţia de bază (9-13) la un termocuplu, în cazul unor temperaturi succesive, T_1, T_o şi T_o, T_2 cu $T_1 < T_o < T_2$, se obţine:

$$E_{T_1}^{T_2}(A,b) = E_{T_1}^{T_o}(A,B) + E_{T_o}^{T_2}(A,B) \quad ; \qquad (9\text{-}15)$$

expresia (9-15) reprezintă <u>legea temperaturilor succesive</u> (E. Becquerel, 1823).

Experienţa şi raţionamente analoage conduc, ca şi în cazul a trei termocupluri constituite din fire de trei metale diferite (A,B), (A,C) şi (B,C) , să se scrie:

$$E_{T_1}^{T_2}(A,B) = E_{T_1}^{T_2}(A,C) - E_{T_1}^{T_2}(B,C) \quad , \qquad (9\text{-}16)$$

egalitate care exprimă <u>legea metalelor succesive</u>.

Dacă avem un termocuplu constituit din două metale oarecare, A şi B , t.e.m.t. $E^{T}_{T_o}(A,B)$ a acestuia, - cînd contactele sînt la două temperaturi oarecare T_o şi T_2 - , poate fi cunoscută dacă se ştiu t.e.m. termoelectrice ale termocuplurilor (A,M) şi (B,M) constituite fiecare din cele două metale şi un al treilea metal de referinţă M (comun), în funcţie de T , una din suduri fiind menţinută la temperatura de referinţă T_o [$E^{T}_{T_o}(A,M)$ şi $E^{T}_{T_o}(B,M)$, T luînd diverse valori].

Din experienţe (M. Avenarius, 1864), s-a stabilit că t.e.m.t. a unui termocuplu constituit din fire metalice variază cu temperatura în limite largi ale acesteia, după o lege parabolică

$$E^{\theta}_{o} = a\theta + \frac{b}{2}\theta^2 \quad , \qquad (9\text{-}17)$$

care reprezintă primii doi termeni ai dezvoltării lui E după $\theta = T - T_o$, T_o fiind o temperatură de referinţă (în general a contactului rece) care se menţine constantă. Tensiunea e.m.t. E^{θ}_{o} are valoarea zero cînd $T = T_o$, trece printr-un maxim egal cu $-a^2/2b$ cînd $\theta_n = -a/b$ (corespunzător vîrfului parabolei) şi îşi schimbă semnul (trecînd prin valoarea zero) cînd $\theta_i = -2a/b$. Aceste valori există în realitate numai cînd corespund limitei de validitate a relaţiei (9-17). Valoarea θ_n corespunde temperaturii neutre, care poate exista numai cînd a şi b sînt de semne contrare.

Dacă $T_o = 0^oC$, - cum se alege de cele mai adeseori în practică - , variaţia t.e.m. termoelectrice a unui termocuplu cu temperatura este descrisă de curba $E(T^oC)$. Curba din fig. 9-18 corespunde termocuplului (Cu, Fe), a cărui t.e.m.t. trece printr-un maxim egal cu aproximativ - 2,5 mV la

temperatura de $T_n = 276^oC$ şi a cărui temperatură de inversiune este $T_i = 460^oC$.

Variaţia t.e.m.t. cu temperatura în cazul termocuplului (Cu, Fe) se poate urmări mai uşor experimental, conectînd direct un asemenea termocuplu la bornele unui galvanometru cu rezistenţa interioară mică (fig. 9-19). La răcire, spotul urmează acelaşi drum, însă în sens invers ca la încălzirea unuia dintre contacte cu o flacără.

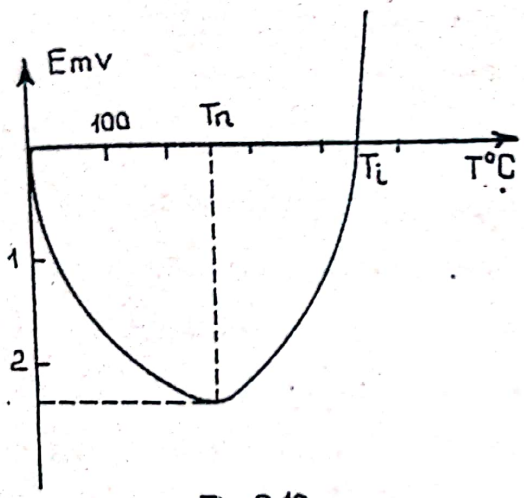


Fig. 9.18.

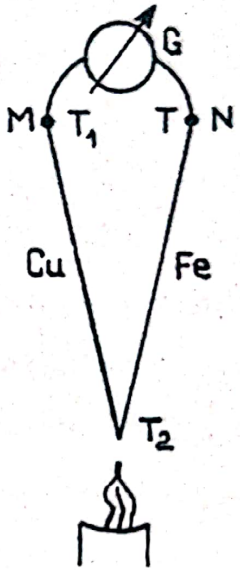


Fig. 9.19.

Deoarece t.e.m.t. E nu este proporţională cu diferenţa de temperatură a contactelor, în mod curent, un termocuplu se caracterizează prin derivata t.e.m.t. în raport cu temperatura:

$$\varphi = \frac{dE}{d\theta} = a + b\theta \qquad (9\text{-}18)$$

care se numeşte <u>t.e.m. diferenţială</u>, <u>putere termoelectrică</u>, sau <u>sensibilitatea termocuplului</u>; aceasta poate fi pozitivă sau negativă şi se masoară, în mod obişnuit, în microvolţi pe grad.

Efectul Seebeck (t.e.m.t.) este modificat atunci cînd asupra firelor din care este constituit termocuplul se exercită acţiuni mecanice (întindere, comprimare), sau cînd acestea se găsesc sub influenţa unui cîmp magnetic ori electric; acest efect este de asemenea influenţat de neomogenităţile conductorilor metalici din care este constituit.

Pentru a putea utiliza un termocuplu convenabil, - în ceea ce priveşte sensibilitatea, domeniul temperaturilor de măsurat, costul metalelor - , în cărţi se dau tabele cu valorile constantelor a şi b pentru termocupluri constituite dintr-un metal oarecare M şi un metal de referinţă M_0 . Metalul de referinţă se cere să fie bine studiat din punct de vedere al proprietăţilor termoelectrice care să varieze lent cu temperatura, să nu sufere transformări fizice în intervalul de temperatură care interesează şi să permită confecţionarea unor termocupluri durabile. Un asemenea metal se părea să fie cuprul cu rezistivităţile la 0°C şi 100°C de $\rho_0 = 1{,}56\ \mu\Omega.cm$ şi $\rho_{100} = 2{,}235\mu\Omega.cm$ şi cu coeficientul de temperatură $\rho_{100} = 1{,}431$, care mai prezintă şi avantajul că impurităţile nu-i modifică mult proprietăţile termoelectrice. Cuprul prezintă însă dezavantajul că la temperaturi de peste 300°C se oxidează repede şi termocuplul este scos din uz. In prezent se utilizează ca metale de referinţă plumbul şi uneori platina, care prezintă un efect Thomson neglijabil. Platina, în special, permite obţinerea de termocupluri durabile, însă prezintă dezavantajul că este mult influenţată de impurităţi în ceea ce priveşte proprietăţile termoelectrice.

In tabelul alăturat se dau valorile constantelor a şi b pentru cîteva metale, ca metal de referinţă M_0 fiind

luat plumbul şi temperatura de referinţă T_o fiind aceea a gheţei care se topeşte. Tensiunea e.m.t. este exprimată în μV şi considerată pozitivă cînd curentul care rezultă circulă spre metalul de referinţă în sudura rece. Valorile lui a şi b sînt altele cînd se ia ca metal de referinţă platina.

Tabelul nr. 9.1

Metalul de referinţă	a	b	Domeniul de validitate (0^oC)
Aluminium	- 0,472	0,003	(- 200, + 100)
Bismut	- 43,7	-0,465	(- 200, + 100)
Constantan	- 38,1	-0,089	(0, + 300)
Cupru	2,76	0,012	(0, + 300)
Fer	16,6	-0,030	(- 100, + 300)
Nichel-crom (85% Ni, 15% Cr)	27,3	-0,032	(0, + 300)
Platină	- 3,04	-0,32	(- 200, + 300)
Platina rhodiată (90% Pt, 10% Rh)	3,98	-0,022	(- 200, + 300)

Expresia t.e.m.t. a unui termocuplu constituit din două metale oarecare M_1 şi M_2, cărora le corespund constantele a_1, b_1 şi a_2, b_2, se deduce imediat ce se calculează constantele acestuia, făcînd diferenţele $a = a_1 - a_2$ şi $b = b_1 - b_2$; procedeul acesta se bazează pe legea metalelor succesive. De exemplu, în cazul termocuplului fer, constantan, se va scrie:

$$(\text{fer,constantan}) = \left[16,6 - (-38,1)\right]T + \left[(-0,030) - (-0,089)\right]T^2$$

$$(\text{fer,constantan}) = 54,7\,T + 0,059\,T^2 \qquad (9\text{-}19)$$

Semnul lui a_i indică sensul curentului; curentul circulă în sudura caldă de la metalul care are constanta a_i mai mică în valoare algebrică, către metalul al doilea. In cazul termocuplului luat ca exemplu, curentul circulă în sudura caldă de la constantan ($a_1 = -38,1$) spre fer ($a_2 = 16,6$).

Acelaşi tablou, pentru cîteva cupluri uzuale conduce să se scrie:

$$\text{(Cu, constantan)} - E_{(\mu V)} = 40,9\ T + 0,05\ T^2$$

$$\text{(NiCr, Pt)} - E_{(\mu V)} = 30,3\ T$$ care este o lege aproape liniară pînă la 1200°C

$$\text{(PtRh, Pt)} - E_{(\mu V)} = 7,02\ T + 0,005\ T^2 \qquad (9\text{-}20)$$

relaţie valabilă pînă la 1600°C.

Observaţie. Efectele termoelectrice nu sînt încă destul de bine studiate; mai există încă unele contradicţii în ceea ce priveşte explicaţia acestora, precum şi asupra diferitelor convenţii utilizate (în special privind polaritatea tensiunilor).

b. Aplicaţiile practice ale efectului Seebeck

1. Principala aplicaţie a efectului Seebeck constă în măsurarea temperaturilor. Cu ajutorul cuplurilor termoelectrice, - numite şi pirometre termoelectrice cînd servesc la măsurarea temperaturilor -, se pot măsura temperaturi cuprinse într-o gamă foarte largă. In funcţie de domeniul de temperaturi de măsurat, de sensibilitatea necesară şi de materialele de care se dispune în laborator, se alege (se alcătuieşte) termocuplul cel mai potrivit, după indicaţiile date în tabele. Pentru măsurarea temperaturilor joase se utilizează, de exemplu, termocuplul cupru,constantan, acesta se poate folosi

de la -190°C pînă la 500°C, cînd t.e.m.t. este de 27,8 mV.

Pentru temperaturi înalte, începînd de la 300°C şi mergînd pînă la 1600°C, se recomandă termocuplurile de Pt, Pt cu 10% rhodiu, sau Pt, Pt cu 10% iridiu. La măsurarea unei temperaturi de circa 700°C, se va utiliza un termocuplu din Fe, constantan care are o sensibilitate de 60 μV/grad în acest domeniu de temperaturi şi un termocuplu din Pt, Pt-Rh (10%), a cărui sensibilitate este mult mai mică.

Termocuplul Pt, Pt-Rh (10% Rh), care poate fi folosit curent pînă la 1400°C (avînd t.e.m.t. la T = 500°C de 4,4 mV), fiind durabil şi permiţînd efectuarea de măsuri îngrijite, este folosit la interpolarea "scării de temperatură" internaţională între 630°C şi 1063°C.

Termocuplul chromel (90% Ni, 10% Cr), alumel (95% Ni, 2% Al, 2% Mn, 1% Si), unul din cele mai frecvente în laboratoare, poate fi folosit la măsurarea temperaturilor cuprinse între 250°C şi 1250°C cu o eroare sub 1% pe baza unei relaţii empirice foarte simple

$$E_{\mu V} = 41\,\theta \qquad (9\text{-}21)$$

Domeniul de temperatură în care poate fi utilizat un termocuplu ca termometru, depinde de natura metalelor care îl constituie: în acel domeniu de temperaturi, cele două metale trebuie să nu sufere transformări fizice, să fie cît mai pure şi să prezinte o variaţie a t.e.m.t. cu temperatura cît mai liniară.

T.e.m. termoelectrică se măsoară cu un compensator, sau cu un milivoltmetru (galvanometru) în cazul cînd se poate menţine constantă rezistenţa electrică a circuitului termocuplului, cu ajutorul unei rezistenţe variabile înserate în circuit (cînd rezistenţa galvanometrului este mare, aceasta re-

zistenţă nu mai este necesară).

Deşi măsurarea temperaturilor cu ajutorul termocuplurilor nu este de mare precizie (eroarea de măsurare nu scade sub cîteva zecimi de grad), - ca în cazul acelora efectuate pe baza variaţiei rezistenţei cu temperatura - , acestea prezintă o serie de avantaje: permit măsurarea temperaturii unei porţiuni mici a unei piese, se pot introduce în spaţii de dimensiuni foarte mici, pot mări variaţii de temperatură relativ rapide, pentru că au inerţie mică şi sînt ieftine.

Un termocuplu bun trebuie să aibă calităţile de a fi durabil (să se poată utiliza de mai multe ori fără să-şi schimbe caracteristica t.e.m.t. - temperatură), de a avea o caracteristică E(T) liniară şi o t.e.m.t. destul de mare (în scopul utilizat).

De exemplu în cazul termocuplului Pt,Pt-Rh (10%) , - la care aliajul este pol pozitiv şi metalul pur pol negativ - , dacă se doreşte ca eroarea care afectează măsurarea temperaturii să fie sub 1°C, atunci efectul neomogenităţii trebuie să fie mai mic de $\pm$ 10 μV ;în condiţii de foarte bună execuţie, neomogenitatea poate interveni cu un efect şi mai mic ($\pm$ 0,2 V), permiţînd efectuarea unei măsurări cu o eroare de aproximativ $\pm$ 0,2°C.

Deşi acest termocuplu poate fi folosit pînă la temperatura de 1600°C, - cînd t.e.m.t. este de 16,78 μV) - , nu este bine să fie utilizat la măsurarea temperaturilor mai mari de 1300°C, întrucît omogenitatea şi durabilitatea suferă din cauza fenomenelor de evaporare, difuzie şi recristalizare a firelor metalice la capătul cald.

In cazul termocuplului cromel,alumel, - care are calitatea de a avea o caracteristică practic liniară (E_o^t = = 41 tμV) - , electrodul de cromel poate prezenta un efect al neomogenităţii pînă la $\pm$ 150 V , ceea ce face ca măsurarea temperaturilor cu acest termocuplu să fie afectată de erori mergînd pînă la $\pm$ 3°C. Pentru a rămîne durabil (neschimbat), acest termocuplu nu trebuie să fie folosit la măsurarea temperaturilor mai mari de 900°C (în caz extrem pînă la 1100°C).

Pentru satisfacerea condiţiei de omogenitate , se recomandă să se folosească fire bine recoapte din metale foarte pure cu structura cubică.

In practică, de cele mai multe ori termocuplurile se etalonează şi se folosesc cu ajutorul unor tabele din care reiese corespondenţa dintre t.e.m.t. şi temperatură, fără ca aceasta să fie exprimată matematic prin o relaţie oarecare.Uneori relaţiile de tipul (9-19) descriu cu o aproximaţie suficient de bună variaţia t.e.m.t. cu temperatura, în anumite intervale de temperatură; în afara acestora însă, deşi termocuplul mai poate fi folosit , relaţia care exprimă E(T) nu mai poate fi aplicată. De exemplu, termocuplul Pt, Pt-Rh poate fi folosit pe baza relaţiei date (9-20) numai pentru intervalul de temperaturi -200°C — + 300°C; în realitate acesta este folosit destul de frecvent pe bază de tabele, pînă la temperatura de 1600°C.

De aceea şi pentru puterea termoelectrică se dă, adesea, o valoare anumită, indicîndu-se în ce domeniu de temperaturi este valabilă. In cazul aceluiaşi termocuplu, Pt, Pt-Rh, din formulă reiese că în jurul temperaturii de 0°C φ = 7μV/grad; în apropierea temperaturii de 1000°C însă, experienţa

conduce la valoarea de — 10 V/grad.

Etalonarea termocuplurilor se face pe baza cunoaşterii temperaturilor de solidificare a unor metale cum sînt Pb (327,35°C), Sb (630,5°C), Ag (960,8°C), Au (1063°C), etc.

2. Temperaturile realizate în mod adecvat, servesc la "stadiul radiaţiilor". Obişnuit, se execută un termocuplu din fire foarte subţiri, care sînt introduse într-un balon în care s-a făcut vid, Contactul cald se realizează prin presare (rezultată din întindere) sau prin sudură (fig.9-20).

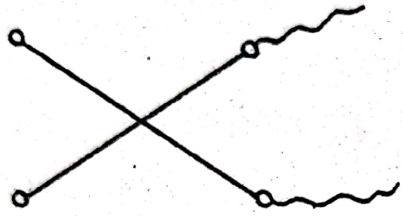


Fig. 9.20.

Radiaţia căreia i se măsoară energia, se face să cadă pe sudura termocuplului; aceasta, avînd o capacitate calorică mică, îşi variază mult temperatura, încît t.e.m.t. rezultată, poate fi măsurată. Unul din termocuplurile cele mai utilizate în acest scop, este cel constituit din Fe şi constantan, care permite, - asociat cu un galvanometru foarte sensibil - , să se pună în evidenţă variaţii de temperatură de ordinul unei milionimi de grad (10^{-6} grad). Termocuplul Fe, constantan are în jurul temperaturii de 20°C o sensibilitate de peste 50 μV/grad. Dispozitivele mai sensibile utilizează aşa numitele pile termoelectrice care sînt alcătuite din mai multe termocupluri cît mai identice, legate în serie.

Instalaţia de măsurare se etalonează cu ajutorul unei surse de energie radiantă cunoscută.

3. Prin asociere în serie, termocuplurile pot conduce la alcătuirea de <u>termopile</u>, care să fie utilizate ca surse de energie electrică (fig. 9-21)- Menţinînd o serie de suduri,

- de exemplu pe cele pare - , la o temperatură mai ridicată decît a doua serie (care poate fi răcită cu un curent de apă , pentru a reduce egalarea temperaturilor celor două categorii de suduri prin conducţie termică), energia termică furnizată sudurilor calde se transformă direct în energie electrică. Construcţia acestora este deosebit de simplă,

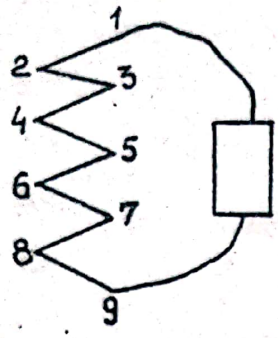


Fig. 9.21.

însă randamentul, în cazul termocuplurilor metalice, este abia de ordinul zecimilor (0,1%). In ultimii ani s-au obţinut termopile din semiconductori, care prezintă t.e.m. termoelectrice de zeci şi sute de ori mai mari decît metalele. Cum şi conductibilitatea termică a semiconductorilor este mai redusă, s-a ajuns să se construiască termopile cu un randament mergînd pînă la 15%, ceea ce este deosebit de important, deşi încă termopilele nu pot produce energie electrică pentru industrie.

4. Termocuplurile sensibile (de exemplu Fe,constantan) sînt utilizate la construirea unor instrumente de măsurare a curenţilor alternativi de joasă şi de înaltă frecvenţă, a căror funcţionare nu este influenţată de prezenţa cîmpurilor magnetice. Curentul alternativ de măsurat, încălzeşte conductorul AB care este fixat la capete; pe acesta se sprijină sudura caldă a unui termocuplu, legat în serie cu un galvanometru sensibil de c.c. (fig. 9-22).

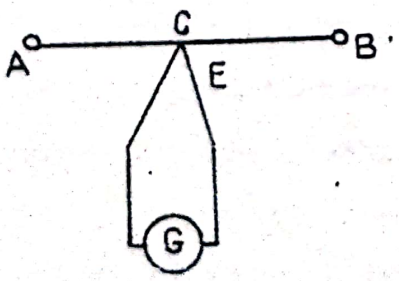


Fig. 9.22.

Prin etalonare, se poate găsi legătura dintre intensitatea curentului alternativ, care

produce încălzirea şi deviaţiile indicate de galvanometru. Sensibilitatea acestor instrumente poate fi mărită dacă se utilizează mai multe termocupluri legate în serie; în acest caz însă, - pentru a se evita efectul de scurt circuit - , suduriile calde se izolează (prin perle de sticlă etc.) de firul AB, ceea ce are efect negativ asupra sensibilităţii (o parte din căldura degajată de firul AB nu ajunge la sudurile calde).

Observaţie. 1. Deşi t.e.m. termoelectrice sînt de ordinul cîtorva microvolţi pe grad, în cazul unor măsurători precise efectuate cu potenţiometrul, cu puntea Wheatstone etc. , trebuie ţinut cont de acestea, întrucît introduc erori sistematice.

2. Studiul efectelor termoelectrice serveşte şi în cunoaşterea naturii transformărilor care pot avea loc în aliaje; în special t.e.m. Thomson şi t.e.m. diferenţială sînt foarte sensibile la aceste transformări.

9.2. Generatori electrochimici

Aceştia sînt generatori de curent continuu care transformă direct energia chimică în energie electrică. Asemenea generatori sînt: pilele chimice clasice, pilele de combustie şi acumulatorii. Capacitatea acestora de a produce energie electrică este redusă şi au o t.e.m. care nu depăşeşte trei volţi (un element). De aceea sînt înlocuiţi în mare parte de generatorii cu inducţie, care au un randament mai bun şi la aceeaşi putere ocupă un spaţiu mai redus. Totuşi generatorii chimici cînt încă de neînlocuit uneori, deoarece au calităţile de a fi autonomi şi transportabili; în continuare, ne vom ocupa de

acești generatori, limitîndu-ne la cesa ce este esențial.

9.2.1. Elemente galvanice.

9.2.1.1. Pila Volta (1795). Dacă se introcuce o lamă (bară) metalică M într-un electrolit L oarecare (fig. 9-8), între cei doi conductori apare o diferență de potențial numită potențial de electrod;

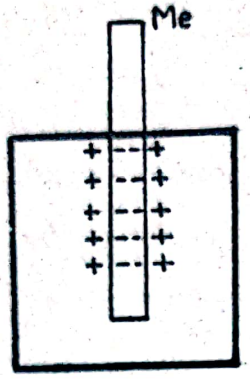


Fig. 9-23

acesta depinde atît de natura metalului cît și de natura electrolitului. Un electrod din alt metal, M' , introdus în același electrolit, va avea un alt potențial de electrod.Deci, doi electrozi metalici de natură diferită, - cupru și zinc de exemplu - , introduși într-un electrolit (fig. 9-9) se vor afla la potențiale diferite. Unind cele două lame, în interiorul vasului, cu un fir conductor (constituit dintr-un metal oarecare M_o) se constată trecerea unui curent electric avînd sensul de la metalul mai puțin atacat de către electrolit (Cu) spre cel mai puternic atacat (Zn). S-a obținut astfel un generator electrochimic care are ca pol pozitiv lama de cupru și ca pol negativ lama de zinc, și care se numește element galvanic sau pilă hidroelectrică.

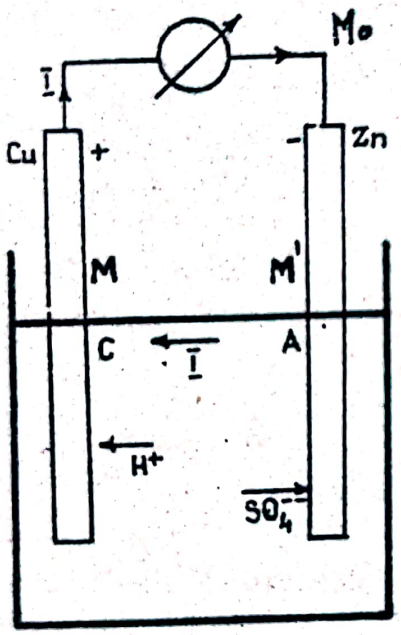


Fig. 9-24

Reacțiile chimice care au loc la cei doi electrozi sînt diferite. In cazul pilei Volta, în jurul electrodului de

zinc se află ioni de zinc (Zn^{++}), iar metalul se încarcă negativ. Dacă circuitul exterior este închis, electronii trec de la polul negativ (Zn) la polul pozitiv (Cu).

Curentul electronic din circuitul exterior, care are sensul de la Cu la Zn, se continuă în interiorul pilei cu sensul de la Zn la Cu şi produce fenomenul de electroliză; electrodul de Zn joacă rolul de anod, iar cel de Cu rolul de catod. Datorită ionilor din soluţie, care determină un curent ionic, la cei doi electrozi nu au loc aceleaşi reacţii:

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \qquad \text{la catod (Cu)}$$

şi

$$SO_4^{--} + Zn \longrightarrow 2e^- + ZnSO_4 \qquad \text{la anod (Zn)}$$

acestea se exprimă mai concis sub forma:

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H \longrightarrow H_2 \qquad \text{la catod}$$

şi

$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^- \qquad \text{la anod}$$

Electronii primiţi în reţeaua electrodului de Zn sînt eliberaţi, în număr egal, din reţeaua electrodului de Cu, producîndu-se hidrogen care se degajă din soluţie.

Deci transformarea chimică globală care se produce în pilă, se traduce prin reacţia:

$$H_2SO_4 + Zn \longrightarrow ZnSO_4 + H_2 \qquad (9 - 22)$$

Diferenţa dintre energia eliberată la anod şi cea consumată la actod prin reacţii chimice, este transmisă electronilor care constituie curentul electric debitat de pilă prin faptul că între cei doi poli se menţine o diferenţă de potenţial.

In cazul pilei Volta, în care ansamblul de reacţii chimice care au loc, se pot rezuma prin schema:

$$Zn + 2H^{+} \longrightarrow Zn^{++} + H_2 \quad , \qquad (9 - 23)$$

se eliberează o energie de aproximativ un joule cînd electrolitul este traversat de o sarcină electrică de un coulomb. In timpul dizolvării unui atom Kilogram de Zn, deoarece fiecare atom de Zn eliberează doi electroni se va produce o sarcină electrică de $2 \times 9{,}65.10^{7}$ coulombi; astfel se explică de ce elementele galvanice pot furniza sarcini electrice mult mai mari decît generatorii electrostatici.

După ce pila Volta debitează curent un timp oarecare, sistemul (pila) nu revine la starea iniţială.

Din cele de mai sus, se constată că în cazul elementelor galvanice avem de-a face cu un <u>lanţ heterogen de conductori metalici</u> şi <u>soluţii de electroliţi</u>. T.e.m. a unui asemenea generator se datorează efectelor de contact între metale şi între metale şi electrolit:

$$E = (M_o/Cu) + (Cu/L) + (L/Zn) + (Zn/M_o) \quad ,$$

unde M_o reprezintă metalul din care este constituit firul care leagă cei doi poli ai pilei.

După legea lanţurilor metalice a lui Volta (9-1) în cazul acestui lanţ heterogen, - deoarece se află în întregime la aceeaşi temperatură - , se poate scrie:

$$(M_o/Cu) + (Cu/Zn) + (Zn/M_o) = 0$$

Din relaţiile de mai sus reiese că metalul intermediar nu intervine, şi că

$$E = (Cu/L) + (L/Zn) + (Zn/Cu) \quad ; \qquad (9 - 24)$$

cum termenul (Zn/Cu), de ordinul milivolţilor, este neglijabil faţă de t.e.m. E , înseamnă că aceasta depinde de fapt de energia reacţiilor chimice care au loc la electrozi.

După cum se constată la pila Volta ca şi în cazul tuturor pilelor chimice, polul pozitiv al generatorului este bine determinat, corespunzînd electrodului cu caracter metalic mai puţin pronunţat; pilele sînt deci aparate polarizate.

Dacă se aplică pilei Volta o tensiune exterioară $V > E$, sensul curentului prin electrolit va fi contrar celui debitat de pilă ca generator; atunci aparatul devine un electrolizor şi se comportă ca un receptor polarizat, caracterizat prin t.c.e.m. E' .

Reacţiile care au loc la electrozi nu sînt inversul reacţiilor (9-8) care se produc atunci cînd sistemul funcţionează ca generator; acestea se pot rezuma scriind:

$$H_2SO_4 + Cu \longrightarrow CuSo_4 + H_2 \quad ,$$

sau

$$Cu + 2H^+ \longrightarrow Cu^{++} + H_2 \quad ; \qquad (9 - 25)$$

hidrogenul se degajă ca şi atunci cînd aparatul este generator.

Deoarece energiile care intervin cînd sistemul electrochimic funcţionează ca generator sau ca receptor nu sînt egale, rezultă că $E \neq E'$.

Pila Volta, care se reprezintă prin schema

$$(+)\ Cu/H_2SO_4/Zn\ (-)$$

nu poate fi readusă la starea iniţială, dacă i se dă din exterior o cantitate de enegrie electrică egală cu cea pe care a furni-

zat-o ca generator; o pilă chimică de acest tip este deci ireversibilă.

In timpul funcţionării pilei Volta, suprafaţa electrozilor suferă modificări; pila se polarizează. Acest fenomen se produce şi în cazul altor pile şi se datorează în special adsorbţiei hidrogenului de către porţiunea polului pozitiv introdusă în electrolit, - adică de catod. Din această cauză, t.e.m. a pilei scade mai mult sau mai puţin repede în timpul funcţionării, - după cum se poate constata şi experimental; dacă pila nu mai debitează curent, aceasta se depolarizează lent în timp.

Deci elementul galvanic Volta este o pilă polarizabilă şi ireversibilă; t.e.m. a acesteia este de aproximativ 0,9 V, ia rezistenţa interioară, - a cărei valoare depinde şi de intensitatea curentului debitat ca la toate pilele chimice - , este de cîţiva ohmi.

9.2.1.2. Pila Daniell. Fenomenul de polarizare chimică face ca pila să devină inutilizabilă; pentru reducerea sau chiar suprimarea polarizării, unul din procedee constă în utilizarea electrozilor nepolarizabili. Aceasta se realizează cu ajutorul unui electrolit, sau a doi electroliţi separaţi printr-un perete poros, care nu permite să se formeze hidrogen la catod. In acest fel se procedează în cazul pilei Daniell, care este constituită din lanţul

$$(+)\ Cu/CuSO_3//ZnSO_4/Zn\ (-)$$

Soluţia saturată de $CuSO_4$ se află într-un vas cu pereţi poroşi, în care se găseşte şi polul pozitiv (Cu), fiind separată de soluţia de sulfat de Zn în care se află electrodul de zinc;

astfel se constituie doi electrozi nepolarizaţi (metal în soluţie de sare proprie).

Cînd pila funcţionează ca generator, reacţiile care au loc se pot schematiza astfel:

$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^{-} \qquad \text{la anod}$$

şi

$$Cu^{++} + 2e^{-} \longrightarrow Cu \qquad \text{la catod;}$$

în ansamblu, se poate deci rezuma:

$$Zn + Cu^{++} \longrightarrow Zn^{++} + Cu \qquad (9-26)$$

sau

$$CuSO_4 + Zn \longrightarrow ZnSO_4 + Cu$$

fără degajare de hidrogen.

Cînd sistemul funcţionează ca receptor, acesta este sediul reacţiilor:

$$Zn^{++} + 2e^{-} \longrightarrow Zn$$

şi

$$Cu \longrightarrow Cu^{++} + 2e^{-} \quad ,$$

adică are loc reacţia globală

$$Zn^{++} + Cu \longrightarrow Zn + Cu^{++} \qquad (9-27)$$

Reacţia (9-13) este exact inversul reacţiei (9-12) care are loc atunci cînd sistemul funcţionează ca generator şi este posibil să se revină la starea iniţială; totodată se constată că $E = E'$.

O pilă chimică, aşa cum este pila Daniell, care poate funcţiona ca generator sau ca receptor polarizat, avînd t.e.m. egală cu t.c.e.m. şi care poate ceda sau primi energie şi astfel să revină la starea iniţială, deoarece reacţiile care au

loc la electrozi sînt reversibile, se numeşte pilă reversibilă. Pila Daniell este deci o pilă nepolarizabilă şi reversibilă, adică că este un aparat polarizat reversibil. T.e.m. a acesteia, - ca la orice pilă reversibilă - , este constantă în timpul funcţionării dacă soluţiile sînt saturate, fiind bine determinată şi nu depinde de intensitatea sau de sensul curentului, avînd valoarea de 1,09 V; rezistenţa interioară a pilei Daniell este de 3-5 Ω .

9.2.1.3. Pila Leclanché. Se pot imagina diverse sisteme electrochimice care să se comporte ca generatori; de aceea s-au construit un foarte mare număr de tipuri de pile chimice. Printre acestea, una din cele mai folosite este pila Leclanché.

In cazul acestei pile se foloseşte al doilea procedeu de depolarizare, care constă în introducerea unui oxidant în electrolit pentru a consuma hidrogenul.

Pila Leclanché este constituită din lanţul cu schema

$$(+)\ C/MnO_2\ //\ NH_4Cl/Zn\ (-)\ ;$$

polul pozitiv este constituit dintr-un baston de cărbune.

Hidrogenul care ia naştere în urma reacţiilor de la anod,

$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^-$$

$$2NH_4Cl \longrightarrow 2NH_4^- + 2Cl^-$$

$$2Cl^- + Zn^{++} \longrightarrow ZnCl_2$$

$$2NH_4^- \longrightarrow 2NH_3 + 2H^+$$

este consumat de bioxidul de mangan lîngă catod:

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H \longrightarrow H_2$$

$$H_2 + 2MnO_2 \longrightarrow Mn_2O_3 + H_2O$$

Clorul eliberat lîngă electrodul de zinc produce clorură de zinc; aceasta se dizolvă în soluţia de electrolit.

Pila Leclanché, care este o pilă nepolarizabilă dar ireversibilă, are o t.e.m. de 1,5-1,65 V şi o rezistenţă de (1-3)Ω ; cu timpul, t.e.m. scade iar rezistenţa interioară creşte, datorită unor depozite ce se formează la electrozi.

Bateriile constituite din asemenea pile, în care electrolitul este imbibat în gelatină (pile uscate) pot avea tensiuni de ordinul sutelor de volţi şi un debit, adică intensitatea curentului furnizat în mod permanent, de ordinul amperului. Sarcina electrică pe care o poate furniza o asemenea pilă în condiţii date, adică capacitatea unei pile Leclanché uzuale, este de aproximativ 100 Wh/kg.

9.2.1.4. Pila Weston. Funcţionarea unei pile electrice se defineşte în general prin t.e.m., debit şi capacitate; o pilă chimică nu poate avea concomitent cele trei caracteristici de performanţă. Dacă unui element galvanic îi caracteristică o t.e.m. constantă în timp şi care variază foarte puţin cu temperatura, atunci acesta poate servi ca pilă etalon şi i se spune în mod curent că este un element normal. O pilă etalon trebuie să fie nepolarizabilă, să fie constituită din substanţe de mare puritate în concentraţii bine stabilite şi să funcţioneze în condiţii de temperatură cunoscute.

O asemenea pilă este elementul normal Weston, care, datorită calităţilor sale, a fost recomandată ca etalon de t.e.m. de către Conferinţa Internaţională de Unităţi Electrice din 1908. După recomandări, aceasta este constituită dintr-un vas de sticlă în formă de H (fig. 9-10) şi se compune din sistemul

(+) $Pt/Hg/Hg_2SO_4/CdSO_4$/amalgam de Cd/Pt (-)

Deasupra mercurului (1), se găseşte o pastă din Hg_2SO_4 şi $3CdSO_4.8H_2O$ (2) . Pentru polul negativ se foloseşte un amalgam de cadmiu, conţinînd 12,5% Cd (3); s-a ales acest procent de cadmiu, deoarece t.e.m. nu mai variază dacă compoziţia amalgamului se schimbă în timp, fără însă ca procentajul în Cd să scadă sub 10%.

In ambele ramuri se găseşte apoi cîte un strat de cristale de sulfat de cadmiu, $3CdSO_4.8H_2O$ (4) şi deasupra o soluţie saturată de sulfat de cadmiu (5), totul fiind bine închis.

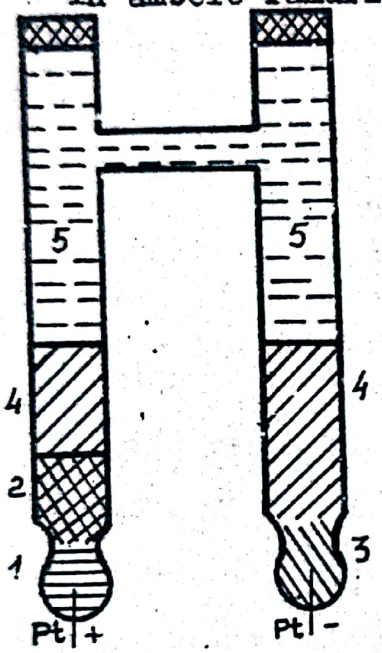


Fig. 9-25

T.e.m. a pilei Weston este E = 1,01864 volţi la 20°C şi variază cu $\Delta E = -4.10^{-5}$ volt/grad. Curentul maxim pe care îl poate debita este de 10^{-4}A; de aceea este utilizată numai la compararea t.e.m. prin metode de zero. Dacă pila este păstrată bine şi întrebuinţată corect, are aceeaşi t.e.m. timp de ani de zile; în cazul cînd a debitat un curent mai mare decît cel admis, t.e.m. scade, iar rezistenţa interioară - care este de aproximativ 1000Ω - , creşte şi îşi revine greu în timp, sau deloc, din cauza solubilităţii reduse a sulfaţilor.

9.2.1.5. <u>Pile de concentraţie</u>. Pentru ca un sistem electrochimic să constituie un generator electric este necesar ca lanţul să nu fie simetric. Aceasta se poate realiza, aşa cum s-a văzut, prin natura diferită a electrozilor.

Disimetria se poate realiza şi în funcţie de electro-

lit, introducînd doi electrozi din acelaşi metal în aceeaşi soluţie dar de concentraţii diferite (fig. 9-11); astfel se obţine o pilă de concentraţie. De exemplu, dacă electrozii sînt din argint şi electrolitul este $AgNO_3$ de concentraţii 0,1 şi 0,01 echivalent kilogram pe metrul cub, se realizează o pilă de concentraţie a cărei t.e.m. este de 0,06 V.

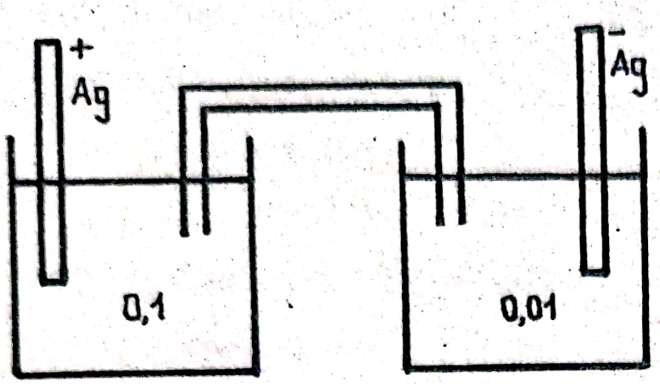


Fig. 9-26

La trecerea curentului electric, concentraţia tinde să se egaleze; polul pozitiv al pilei corespunde electrodului introdus în soluţia de concentraţie mai mare, în acord cu principiul conservării şi transformării energiei. Deoarece t.e.m. este redusă, ca şi capacitatea, aceste pile prezintă numai interes teoretic.

Observaţie. Teoriile termodinamice ale pilelor reversibile care ţin seama de energiile reacţiilor care au loc în pilă, permit să se calculeze t.e.m., independent de localizarea acesteia şi de mecanismul de producere. De exemplu, în cazul pilei Daniell, se obţine E = 1,077 V în loc de 1,09 V.

9.2.2. Pile de conbustie.

Construcţia acestor pile se bazează pe fenomenul invers electrolizei, schema de constituţie fiind

combustibil - electrolit - oxidant

Combustibilul (sau carburantul) poate fi gazos, lichid sau solid (hidrogen, metan, carbon), iar oxidantul (sau carburantul) este oxigenul pur sau aerul.

Electrolitul, în majoritatea cazurilor bazic, poate fi şi acid, în soluţie sau topit. Electrozii sînt constituiţi din plăci de metal cum este nichelul, argintul, platina etc., obţinute din pulberi prin sinterizare, încît prezintă diverse grade de porozitate. Aceştia joacă rolul de catalizator şi permit să se calculeze energia electrică care provine direct din energia de oxido-reducere. Există tipuri de pile de combustie care funcţionează la temperaturi diferite: la temperaturi joase (0-150°C), medii (150°-400°C) sau înalte (500°-1000°C).

De exemplu, în cazul pilei de combustie cu hidrogen, electrozii pot fi constituiţi din plăci sinterizate de nichel, avînd porozităţi diferite în raport cu cele două feţe ale plăcii (fig. 9-12); se poate folosi o soluţie de KOH. Electrolitul se găseşte între doi electrozi, în contact cu feţele acestora unde porozitatea este mai mică. In una din plăci, A, se trimite un curent de hidrogen sub presiune dinspre faţa unde porozitatea este mai mare; în cea de a doua placă B, se trimite un curent de oxigen în aceleaşi condiţii.

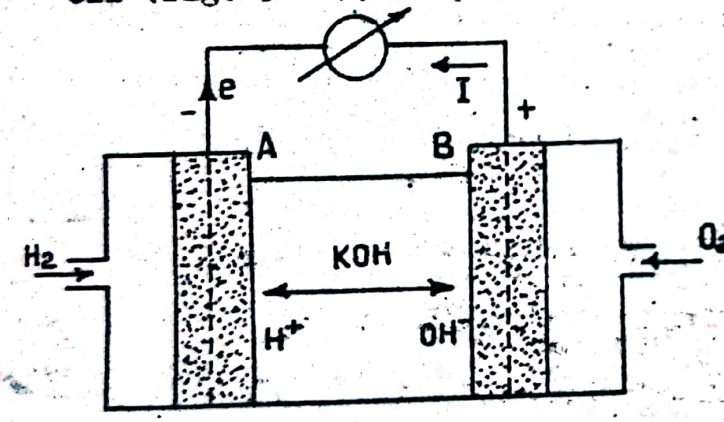


Fig. 9- 27

In placa A iau naştere ioni de hidrogen:

$$H_2 \longrightarrow 2H \longrightarrow 2H^+ \quad ;$$

aceştia ieşind din placă, o încarcă negativ. In placa B, unde vin electronii de la placa A, datorită oxigenului se formează ioni de OH^-; aceştia, intrînd în soluţie, încarcă placa pozitiv. In soluţie, ionii H^+ şi OH^- se recombină, formînd apă.

Bilanţul reacţiilor chimice are loc după schemele:

$2H_2 + 4OH^- \longrightarrow 4H_2O + 4e^-$ la polul negativ, şi

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$ la polul pozitiv.

T.e.m. a acestei pile este de 0,7 volţi.

Pilele de combustie prezintă avantajul, faţă de cele chimice, că au un randament mai mare care poate ajunge, după cum prevede teoria, pînă la 60-90% şi pentru că au o durată de funcţionare mai mare.

Deşi au fost descoperite la sfîrşitul secolului trecut (Grove, 1894), pilele de combustie au început să fie întrebuinţate abia după 1947, cînd s-a pus la punct tehnologia fabricării electrozilor. In prezent se fac studii pentru a fi utilizate la scară industrială, - folosindu-se materii prime ieftine (hidrogen, metanol etc.), şi referitor la reînnoirea combustibilului în timpul funcţionării. Unele tipuri din aceste pile, care au ajuns să aibă o putere de ordinul kilowaţilor, au fost utilizate la navele spaţiale.

9.2.3. Acumulatori

9.2.3.1. Acumulatori cu plumb. Un vas de sticlă (ebonită, etc.) în care se află soluţie de acid sulfuric 20% şi doi electrozi de plumb, nu constituie o pilă, deoarece sistemul este simetric. Dacă se trece prin acest electrolizor (voltametru) curent electric, un timp oarecare, lanţul electrochimic a devenit asimetric pe cale artificială în urma reacţiilor chimice care au avut loc la electrozi; acum celula electrochimică a devenit un generator electric. Deci, sistemul Pb, H_2SO_4, Pb , primeşte energie electrică; o înmagazinează nu sub această formă, ci printr-un fenomen invers celuia care se produce în-

tr-o pilă, o concentrează la electrozi sub formă de energie chimică şi o restituie sub formă de energie electrică. Un asemenea sistem electrochimic, care nu este de fapt un mijloc de producere a electricităţii, ci numai un sistem care permite acumularea acestuia, se numeşte <u>acumulator</u> sau <u>pilă secundară</u>.

O instalaţie realizată după schema din fig. 9-13, permite să se constate cele afirmate mai înainte. Făcînd contactul 1-2, 1'-2' , curentul electric trece prin celula electrolitică A , datorită sursei de curent continuu E . Intrerupînd aceste contacte şi făcînd apoi contactele 1-3, 1'-3' , se constată că soneria S care este parcursă de un curent în sensul arătat pe figură, funcţionează un timp oarecare. Pentru ca A să poată debita din nou curent electric, este necesar să se repete operaţia descrisă. Capacitatea unei asemenea celule de acumulator poate fi mărită, repetînd succesiv de un număr de ori, operaţia de trecere a curentului prin celulă datorită unei surse de curent continuu exterioare (fig. 9-14),

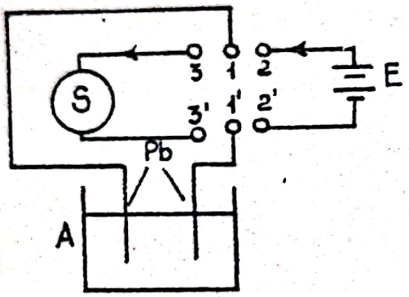


Fig. 9-28

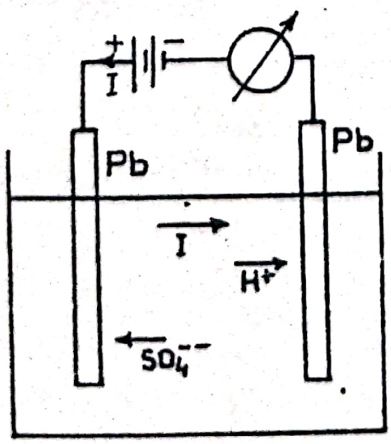


Fig. 9-29

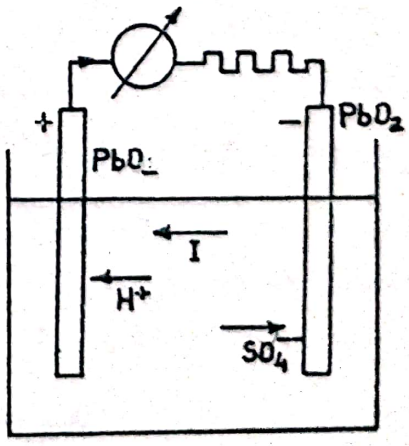


Fig. 9-30

numită <u>încărcare</u> şi operaţia de debitare a curentului de către sistem, care se numeşte <u>descărcare</u> (fig. 9-15).

După o descriere schematică a acestui mod de formare a unei celule de acumulator cu plumb, la încărcare oxigenul care se formează prin electroliză oxidează anodul formînd bioxid de plumb (de culoare brună), iar hidrogenul este adsorbit de catod (care devine gri). La descărcare, hidrogenul care se formează la polul pozitiv iarăşi prin electroliză, - dar de această dată datorită curentului debitat de celula însăşi - , reduce bioxidul de plumb la oxid de plumb ($PbO_2 + H_2 \longrightarrow PbO + H_2O$), iar acesta fiind atacat de acidul sulfuric, conduce la formarea unui sulfat de plumb ($PbO + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4 + H_2O$). La polul negativ, unde se formează oxigen, se reduce hidrogenul adsorbit şi totodată se atacă plumbul de către acidul sulfuric, formîndu-se sulfat de plumb.

In practică, pentru a obţine acumulatori cît mai economici şi de capacitate cît mai mare, se înlocuieşte formarea naturală prin una artificială, constituind plăci de plumb cu alveole; plăcile pozitive au în alveole o pastă presată care conţine Pb_3O_4 (minium), iar în alveolele plăcilor negative se presează o pastă de PbO (litargă). Un acumulator cu pastă de oxizi în alveole se formează după prima încărcare, - căci la anod se formează PbO_2 , iar la catod Pb spongios în cantitate mare (fig. 9-15).

Un acumulator încărcat, este deci constituit din lanţul

$$(+)\ PbO_2/H_2SO_4/Pb\ (-)$$

După teoria dublei sulfatări, care deşi prezintă unele lacune, este singura acceptată, reacţiile care au loc la

electrozi în timpul descărcării şi încărcării se pot sintetiza astfel:

$$PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{--} + 2e^- \underset{\text{înc}}{\overset{\text{desc}}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2H_2O \quad \text{la (+)}$$

$$Pb + SO_4^{--} \underset{\text{înc}}{\overset{\text{desc}}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2e^- \; ; \quad \text{la (-)}$$

iar schema reacţiei globale este:

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \underset{\text{înc}}{\overset{\text{desc}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O$$

Această teorie, deşi imperfectă, explică aproximativ faptele experimentale. In timpul descărcării, celula funcţionează ca generator şi curentul trece prin electrolit de la electrodul de Pb la cel de PbO_2; la sfîrşitul descărcării , pe electrozi găsindu-se SO_4Pb, densitatea acidului sulfuric ajunge să fie 1,15 în loc de 1,3 cît era iniţial. In timpul încărcării, celula este un electrolizor, - adică un receptor-, prin care curentul trece în sens invers. T.c.e.m. este ceva mai mare decît t.e.m., ambele avînd valoarea de aproximativ 2 volţi; deoarece $E \approx E'$, celula de acumulator cu plumb este considerată ca un aparat polarizat reversibil. Curbele din fig. 9-16 a descriu modul de variaţie a lui E şi E' în timp.

In timpul încărcării, t.c.e.m. are valoarea de aproximativ 2,2 V; cînd t.c.e.m. ajunge la circa 2,5 volţi şi are loc o puternică degajare de gaze, acumulatorul este încărcat. In timpul descărcării, E scade lent, variind între 2 V şi 1,9 V; cînd $E \approx 1,8$ V , scăderea este rapidă şi acumulatorul nu mai poate fi folosit. Variaţia t.e.m. cu temperatura, în jurul temperaturii ambiante, este neglijabilă:

$\Delta E = 3.10^{-4}$ V/grad. Rezistenţa interioară a unui acumulator cu Pb este de ordinul a $(10^{-2} - 10^{-4})\Omega$, depinzînd de suprafaţa plăcilor şi de stadiul de încărcare, căci densitatea acidului sulfuric variază în timpul utilizării.

Capacitatea unui acumulator cu plumb, adică sarcina electrică pe care o poate debita acesta în condiţii normale de folosire, creşte proporţional cu suprafaţa plăcilor, - deci şi cu greutatea lor - , şi variază între 15 şi 30 Ah/kg sau 30-60 Wh/kg. In funcţie de construcţie, curentul normal de des-

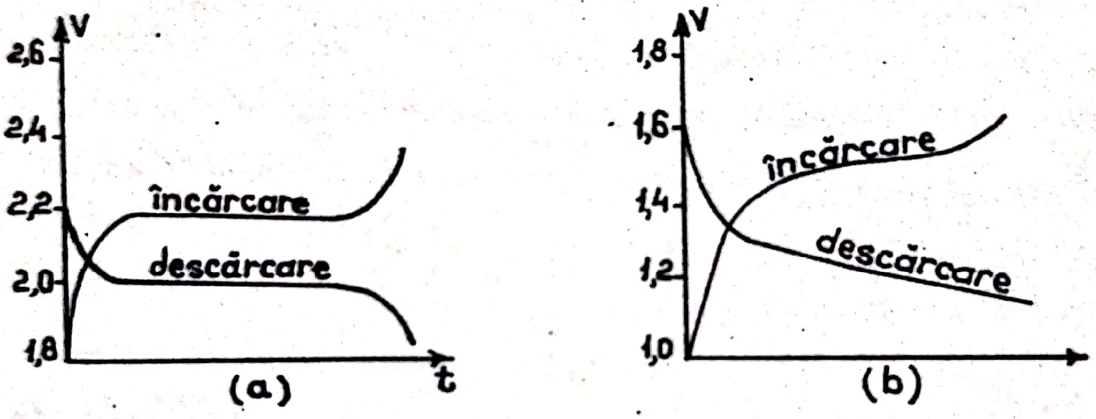


Fig. 9-31

cărcare are o asemenea intensitate, încît descarcă acumulatorul în 10 sau 5 ore. Unii acumulatori, cum sînt cei de la automobile, pot debita un curent de cîteva zeci de ori mai intens decît cel normal, un timp scurt, fără să se deterioreze.

Capacitatea este mai mare, atunci cînd curentul debitat este mai puţin intens, deoarece astfel reacţiile chimice au loc pînă la profunzimea plăcilor. Dacă intensitatea curentului debitat depăşeşte intensitatea curentului normal de descărcare, reacţiile chimice care au loc încălzesc plăcile şi din cauza dilatării, pasta din alveole se desprinde; aceasta

are ca urmare deteriorarea acumulatorului.

Randamentul în sarcină electrică , η_q , - adică raportul dintre sarcina electrică furnizată de acumulator în timpul utilizării şi cea absorbită la încărcare - , este de 85 - 90% şi uneori peste 90%. Randamentul în energie electrică, η_W , - adică raportul dintre energia furnizată şi cea absorbită - , este mult mai mic (70-80%), deoarece în timpul descărcării t.e.m. este mai mică decît t.c.e.m. în timpul încărcării.

Acumulatorii cu plumb sînt fragili, sarcina acestora scade zilnic cu 1-2% atunci cînd nu sînt utilizaţi şi emană acid. Dacă neutilizarea durează pînă la o lună de zile, plăcile se acoperă (prin procesul de "sulfatare") cu un strat de sulfat de plumb cristalizat şi dur care împiedică o încărcare normală a acumulatorului. De aceea, acumulatorii cu plumb trebuie încărcaţi la cel mult patru săptămîni, chiar dacă nu sînt utilizaţi. La temperaturi mai coborîte, capacitatea acestora scade, iar rezistenţa interioară creşte.

Observaţie. S-au făcut numeroase încercări de a construi acumulatori care să difere, fie prin natura electrozilor, fie prin natura acidă sau bazică a electrolitului. Tipul de acumulator cel mai utilizat, - care este şi cel mai vechi (G.Planté, 1859) - , este acumulatorul cu plăci de plumb, al cărui electrolit este acid. Printre acumulatorii alcalini (cu electrolit bazic), cei care prezintă performanţe din punct de vedere al capacităţii, randamentului şi preţului, sînt cei de nichel cu fier sau cu cadmiu şi acumulatorii cu argint.

9.2.3.2. Acumulatorii fier-nichel. Aceştia sînt constituiţi din lanţul:

(+) Ni_2O_3 / soluţie KOH / Fe (-)

Una din formele constructive constă din plăci de oţel cu alveole, - în care se presează praf de fier divizat - , fixate de vasul de fier în care se află şi electrolitul (hidrat de potasiu 20%, cu adaus de LiOH), constituind polul negativ. Polul pozitiv este constituit din praf de nichel şi hidroxid de nichel (adică un oxid superior de nichel - Ni_2O_3) care se află în nişte săculeţe din sită ţ de nichel.

Cu oarecare aproximaţie, reacţiile care au loc la electrozi se pot exprima prin ecuaţiile:

$$Fe(OH)_2 + 2e^- \underset{\text{desc.}}{\overset{\text{înc.}}{\rightleftarrows}} Fe + 2OH^- \qquad \text{la (-)}$$

$$2Ni(OH)_2 + 2OH^- \underset{\text{desc.}}{\overset{\text{înc.}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_3 + 2e^- \qquad \text{la (+)},$$

iar reacţia globală se poate schiţa astfel:

$$Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \underset{\text{desc.}}{\overset{\text{înc.}}{\rightleftarrows}} Fe + 2Ni(OH)_3$$

sau

$$Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \underset{\text{desc.}}{\overset{\text{înc.}}{\rightleftarrows}} Fe + Ni_2O_3 + 3H_2O$$

Acumulatorii Fe-Ni au o t.e.m. de circa 1,3 V, care scade în timpul utilizării mult mai repede decît t.e.m. a acumulatorilor cu plumb. Aceştia au o capacitate de (30-50) Wh/kg, un randament în energie electrică de circa 60% şi o rezistenţă interioară ceva mai mare decît a acumulatorilor cu plumb (de aceeaşi capacitate).

Acumulatorii Fe-Ni sînt însă foarte robuşti, putînd fi utilizaţi într-un regim oricît de dur (curent de descărcare oricît de mare) şi chiar complet şi sînt uşor de întreţinut

(pot rămîne încărcaţi şi nefolosiţi mult timp fără să se deterioreze).

Dacă se înlocuieşte fierul cu cadmiul, se obţin acumulatori Cd-Ni care sînt asemenea cu cei de fier şi nichel, însă au o durată de viaţă mai îndelungată.

9.2.3.3. Acumulatorii cu argint. Aceştia sînt formaţi din lanţul:

$$(+)\ Ag\ /\ KOH\ /\ Zn\ (-)\ ;$$

polul negativ este constituit din electrozi poroşi de zinc , iar cel pozitiv din pulbere de argint presată şi sinterizată.

Acumulatorii cu argint deşi au fost descoperiţi la sfîrşitul secolului trecut (1897), au putut fi folosiţi abia peste jumătate de secol, cînd tehnica modernă a permis construirea complicată a acestora, astfel ca să fie convenabili. Deşi sînt de aproximativ 5 sau 6 ori mai scumpi decît acumulatorii cu plumb, acumulatorii cu argint sînt preferaţi, în special atunci cînd spaţiul şi greutatea sînt limitate. Aceştia se caracterizează prin o t.e.m. de circa 1,4 volţi, care nu variază cu regimul de descărcare, prin o capacitate de 120 Wh/kg şi prin randamentele $\eta_q = 98\%$, $\eta_W = 85\%$.

Observaţie. Bateriile de acumulatori care sînt fixe, pot avea o capacitate de peste 1000 Ah. Acestea se folosesc în lipsa unui sector de curent alternativ, pentru a completa insuficienţa dinamurilor în orele de vîrf, ca surse de securitate (la teatre, uzine etc.), la centralele de tramvaie etc. Bateriile sau elementele transportabile se folosesc la căile ferate pentru tracţiune sau iluminat, la automobile, în radiotelegrafie, telefonie, lanterne etc.

Scanned with OKEN Scanner

TABLA DE MATERII

Introducere . . . . . pg. 3

a. Obiectul studiului 3

b. Privire asupra constituţiei substanţelor 1o

Partea I-a 16

Electrostatica 16

Cap.1. Electrostatica vidului 16

1.1. Fenomene de electrizare 16

1.1.1. Electrizarea prin frecare 16

1.1.2. Definiţia electrostaticii 17

1.1.3. Dispozitive pentru studiul electrizării 17

1.1.4. Cele două feluri de sarcini electrice 19

1.1.5. Conductori şi izolanţi 21

1.2. Legea lui Coulomb 23

1.2.1. Noţiunea de sarcină electrică 23

1.2.4. Unitatea de sarcină electrică 3o

1.2.5. Sisteme de unităţi nerafionalizate şi raţionalizate . . .32

1.2.6. Consecinţe ale legii lui Coulobm 34

1.2.7. Distribuţia macroscopică a sarcinilor electrice 34

1.2.7.1. Densitatea volumică de sarcină 35

1.2.7.2. Densitatea superficială de sarcină 36

1.2.7.3. Densitatea liniară de sarcină 37

1.3. Legea conservării sarcinii electrice 38

1.4. Cîmpul electrostatic în vid 4o

1.4.1. Noţiunea de cîmp electric 4o

1.4.2. Reprezentarea cîmpului electric. 43

1.4.3. Expresiile cîmpului electric în cazul unor distribuţii de sarcină 45

Scanned with OKEN Scanner

1.4.4. Principiul superpoziţiei cîmpurilor 46
1.4.5. Fluxul cîmpului electric 47
1.4.5.1. Definiţii 47
1.4.5.2. Fluxul cîmpului electric, datorat unei sarcini electrice punctiforme, printr-un element de suprafaţă 49
1.4.5.3. Fluxul printr-o suprafaţă finită S a cîmpului electric datorat unei sarcini punctiforme q 50
1.4.6. Teorema lui Gauss 52
1.4.6.1. Fluxul cîmpului electric printr-o suprafaţă închisă, datorat unei sarcini punctiforme q_e exterioare suprafeţei. 52
1.4.6.2. Sarcina punctiformă q se află în interiorul suprafeţei S 54
1.4.6.3. Sarcina punctiformă q_s se află pe suprafaţa închisă S . 55
1.4.6.4. Generalizare. 55
1.4.6.6. Vectorul inducţie electrică 57
1.4.6.6. Conservarea fluxului cîmpului electric. 58
1.4.7. Aplicaţii ale teoremei lui Gauss 60
1.4.7.1. Condiţii de trecere (la limită) ale cîmpului electric . 60
1.4.7.1.1. Distribuţia superficială de sarcină 60
a. Componenţa normală 60
b. Componenta tangenţială 61
c. Cîmpul electric pe suprafaţa S 62
1.4.7.1.2. Distribuţia volumică de sarcină 63
a. Cîmpul electric în vecinătatea unui punct unde există o densitate volumică de sarcină 63
b. Sarcini distribuite într-un volum limitat de o suprafaţă. . . 63
1.5. Potenţial electrostatic în vid 65
1.5.1. Lucrul mecanic produs prin acţiunea unei forţe electrostatice asupra unei sarcini de probă punctiforme 65
1.5.2. Circulaţia vectorului cîmp electric datorat unei sarcini punctiforme 66

Scanned with OKEN Scanner

1.5.3. Noţiunea de potenţial electrostatic 68
1.5.4. Potenţial în cazul unor distribuţii de sarcină 71
1.5.4.1. Ansamblu de sarcini punctiforme 71
1.5.4.2. Distribuţii liniare, superficiale şi volumice ale sarcinilor 72
1.5.5. Lucrul forţelor electrice. Unitatea de potenţial 72
1.5.6. Relaţia dintre cîmp şi potenţial 74
1.5.7. Suprafeţele echipotenţiale (sau suprafeţele de nivel) . . 75
1.5.8. Extremele potenţialului electrostatic 77
1.6. Determinarea potenţialului şi cîmpului electric în cîteva cazuri particulare 78
1.6.1. Metode de determinare ale potenţialului şi cîmpului . . . 78
1.6.2. Distribuţia de sarcini punctiforme 79
1.6-2.1. Sarcina punctiformă 79
1.6.2.2. Dipolul electric 8o
1.6.2.2.1. Definiţie 8o
1.6.2.2.2. Potenţialul datorat unui dipol
1.6.2.2.3. Unitatea de moment electric 82
1.6.2.2.4. Cîmpul produs de un dipol 83
a.Poziţiile lui Gauss 84
b. Prima poziţie a lui Gauss 85
c. A doua poziţie a lui Gauss 85
1.6.2.3. Momentul multipolar al unei distribuţii de sarcini punctiforme 85
1.6.2.3.1. Expresia generală a potenţialului 85
1.6.2.3.2. Distribuţie polară 88
1.6.2.3.3. Distribuţie dipolară. 88
1.6.2.3.4. Distribuţie cvadripolară 89
1.6.3. Distribuţie liniară de sarcină 9o
1.6.4. Distribuţie superficială de sarcină 92
1.6.4.1 Precizări. 92

1.6.4.2. Cîmpul creat de o pătură plană, circulară uniform electrizată, într-un punct de pe axa sa 93
1.6.4.3. Potenţialul şi cîmpul în cazul unui plan infinit uniform electrizat 95
1.6.4.4. Pătură sferică uniform electrizată 97
1.6.5. Distribuţie volumică de sarcini. 1oo
1.6.5.1. Precizări 1oo
1.6.5.2. Cîmpul potenţialul datorate unei sfere uniform electrizate în întregul volum 1o2
1.6.5.2.1. Cîmpul electric 1o2
1.7. Ecuaţiile locale şi integrale ale cîmpului şi potenţialului electrostatic 1o5
1.7.1. Definiţii 1o5
1.7.2. Rotorul cîmpului electrostatic 1o6
1.7.3. Divergenţa cîmpului electrostatic 1o7
1.7.4. Ecuaţia lui Poisson şi ecuaţia lui Laplace pentru potenţial 1o8
1.7.5. Caracterele particulare ale vectorilor E şi D. 1o9
Cap.2. Conductorii în electrostatică 111
2.1. Proprietăţile fundamentale ale conductorilor în echilibru electrostatic (în vid) 111
2.1.1. Generalităţi. 111
2.1.2. Cazul conductorilor plini 111
2.1.3. Cazul particular al conductorilor cu cavitate 117
2.1.4. Verificarea experimentală a lipsei sarcinilor în interiorul conductorilor electrizaţi 118
2.1.4.1. Cuşca lui Faraday 118
2.1.4.2. Cilindrul lui Faraday 119
2.1.4.3. Electrometrul cu foiţe 12o

Scanned with OKEN Scanner

2.1.5. Electrizarea prin contact.Planul de probă 121
2.2. Cîmpul electric pe suprafaţa şi în exteriorul conductorilor . .
2.2.1. Cîmpul electric în vecinătatea suprafeţei unui conductor. Teorema lui Coulomb. 123
2.2.2. Cîmpul într-un punct de la suprafaţa unui conductor încărcat cu electricitate 125
2.3. Precizări privind cîmpul şi potenţialul în cazul conductorilor electrizaţi 126
2.4. Presiune electrostatică 129
2.5. Repartiţia sarcinilor pe suprafaţa unui conductor electrizat şi a cîmpului în vecinătatea suprafeţei acestuia 130
2.6. Elemente corespondente 135
2.7. Influenţă electrostatică 137
2.7.1. Experienţe şi definiţii. Cazul unui conductor izolant . .137
2.7.2. Explicaţia fenomenului 140
2.7.3. Cazul unui conductor menţinut la potenţial constant . . 143
2.8. Echilibrul electrostatic al sistemelor de conductori în vid 146
2.8.1. Generalităţi 146
2.8.2. Teorema suprapunerii stărilor de echilibru 148
2.9. Influenţa totală 152
2.9.1. Experienţe şi definiţii 152
2.9.2. Caracteristicile fenomenului de influenţă totală 154
2.9.3. Ecran electric. 157
a, Conductorul B 157
b. Conductorul b să fie izolat 159
c. Aplicaţiile ecranului electric 160
2.10. Capacitate şi condensatori. 160
2.10.1. Capacitatea unui conductor izolat 160
2.10.1.1. Definiţii 160
2.10.1.2. Capacitatea unui conductor sferic izolat. 161

2.1o.2. Coeficientul de influenţă 162
2.1o.2.1. Definiţii 162
2.1o.2.2. Prqrietăţile coeficienţilor de influenţă 167
2.1o.3. Capacitatea unui conductor vecin cu un alt conductor . .169
2.1o.4. Capacitatea unui condensator 171
2.1o.5.1. Calculul capacităţii unor condensatori de formă geometrică simplă. 174
2.1o.5.1. Generalităţi 174
2.1o.5.2. Condensatorul plan 176
2.1o.5.3. Condensator de formă oarecare cu distanţa dintre armături foarte mică şi constantă. 178
2.1o.5.4. Condensatorul sferic 180
2.1o.5.5. Condensatorul cilindric 183
2.1o.6. Gruparea condensatorilor 184
2.1o.6.1. Gruparea în paralel 185
2.1o.6.2. Gruparea în serie 186
2.1o.7. Condensatori uzuali 189
2.1o.7.1. Generalităţi, ... 189
2.1o.7.2. Butelia de Leyda 190
2.1o.7.3. Condensatori cu mica 191
2.1o.7.4. Condensatori cu hîrtie 191
2.1o.7.5. Condensatori electrolitici 193
2.1o.7.6. Alte tipuri de condensatori 194
2.1o.7.7. Condensatori variabili cu aer 194

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul III Dielectricii . . . . . pg.
3.1.Experienţe . . . . . .
3.1.1. Repetarea unei experienţe de influenţă electrostatică ..
3.1.2. Experienţa lui Epinus şi alte experienţe utilizînd un condensator . . . . . .
a. Experienţa condensatorului lui Epinus . . . . . .
b. Condensator încărcat cu o sarcină electrică constantă . . .
c. Condensator menţinut încărcat sub tensiune constantă . . . .
3.2. Polarizarea dielectricilor . . . . . .
3.2.1. Introducere . . . . . .
3.2.2. Dielectrici în cîmp electric. . . . . .
3.2.2.1. Polarizarea electronică . . . . . .
3.2.2.2. Polarizarea ionică . . . . . .
3.2.2.3. Polarizarea dipolară . . . . . .
3.2.3. Vectorul polarizare P. . . . . .
3.3. Acţiunile produse de dielectricii polarizaţi . . . . . .
3.3.1. Potenţialul şi cîmpul într-un punct exterior dielectricului . . . . . .
3.3.2. Precizare. . . . . .
3.3.3. Potenţialul şi cîmpul într-un punct interior dielectricului . . . . . .
3.3.4. Precizare . . . . . .
3.3.5. Discontinuitatea vectorilor E şi D la suprafaţa de separaţie a doi dielectrici polarizaţi . . . . . .
3.3.6. Teorema lui Gauss în cazul dielectricilor . . . . . .
3.3.7. Cazul polarizării uniforme . . . . . .
3.4. Dielectricii perfecţi . . . . . .
3.5. Condensatorul plan cu dielectric. Interpretarea experienţelor fundamentale . . . . . .

Scanned with OKEN Scanner

3.6. Legea lui Coulomb 227
3.7. Dielectricii anizotropi 229
3.8. Dielectricii reali 230
3.8.1. Utilizare. 230
3.8.2. Parametrii caracteristici ai dielectricilor reali . . . 230
3.8.2.1. Constanta dielectrică relativă 230
3.8.2.2. Rigiditatea dielectrică 231
3.8.2.3. Temperatura maximă de utilizare 232
3.8.2.4. Factorul de merit al dielectricului unui condensator . 233
3.8.2.5. Unghiul de pierderi. 234
3.8.2.6. Alte caracteristici 235
3.8.2.7. Sarcini reziduale 237
3.9. Piezielectricitate 238
3.9.1. Efectul piezoelectric. 239
a.Efectul longitudinal 240
b.Efect transversal 239
c.Efectul piezoelectric şi structura cristalelor. 240
3.9.2. Aplicaţiile efectului piezoelectric. 242
Cap.IV. Energia forţele în electrostatică. 243
4.1. Energia electrostatică. 243
4.1.1. Energia electrostatică a unei sarcini punctiforme aflate într-un cîmp electric. 243
4.1.2. Energia electrostatică a unor distribuţii de sarcină . . 246
4.1.2.1. Energia electrostatică a unui sistem de două sarcini punctiforme 246
4.1.2.2. Energia unui sistem de mai multe sarcini punctiforme . 246
4.1.2.3. Energia potenţială în cazul unei distribuţii continue de sarcini 248
4.1.2.4. Energia potenţială a unui dipol aflat într-un cîmp electric. 249
4.1.3. Energia electrostatică a unui sistem de conductori în

echilibru. . . . . .
4.1.3.1. Energia electrostatică a unui conductor electrizat. . .
4.1.3.2. Energia unui sistem de conductori electrizaţi în echilibru . . . . . .
4.1.3.3. Energia electrostatică a unui condensator . . . . . .
4.1.3.4. Experienţa lui Riess . . . . . .
4.1.4. Localizarea energiei electrostatice. . . . . .
4.2. Forţe electrostatice . . . . . .
4.2.1. Procedee de calcul . . . . . .
4.2.1.1. Calculul direct . . . . . .
4.2.1.2. Calculul lui F şi plecînd de la energie . . . . . .
4.2.2. Relaţia dintre energie şi forţele care acţionează asupra unui conductor . . . . . .
4.2.2.1. Formule generale . . . . . .
4.2.2.2. Transformarea la sarcină constantă . . . . . .
4.2.2.3. Transformarea la potenţial constant. . . . . .
4.2.3. Forţa şi momentul forţelor care acţionează asupra unui dipol . . . . . .
4.2.4. Electrometre . . . . . .
4.2.4.1. Principiul de construcţie . . . . . .
4.2.4.2. Electrometrul absolut cu platane(W.Thomson). . . . . .
4.2.4.3. Electrometrul cu cadrane. . . . . .
4.2.4.3.1. Principiul de construcţie . . . . . .
4.2.4.3.2. Electrometrul cu cadrane al lui Thomson. . . . . .
4.3. Generatori electrostatic. . . . . .
4.3.1. Electroforul. . . . . .
4.3.2. Maşina Wimshurst. . . . . .
4.3.3. Maşina Felici . . . . . .
4.4.4.Maşina (R.I,)Van de [illegible] (1933) . . . . . .

Capitolul V.- Generalităţi asupra curentului electric pg.287
5.1. Noţiunea de curent electric. 287
5.2. Vectorul densitate de curent 288
5.2.1. Definiţii. 290
5.2.2. Proprietăţile vectorului densitate de curent 290
5.3. Intensitatea de curent 292
Cap.VI. Legea lui Ohm. Energia electrică în curent continuu . . 294
6.1. Legea lui Ohm (sub formă)locală. 294
6.1.1. Regim permanent de curent. 294
6.1.2. Dinamica mişcării purtătorilor de sarcină 296
6.2. Legea lui Ohm (sub formă integrală 299
6.3. Variaţia rezistivităţii cu diverşi factori.. 305
6.3.1. Rezistivitatea depinde de natura corpului. 305
6.3.2. Variaţia rezistivităţii cu temperatura 308
6.3.2.1. Cazul metalelor 308
6.3.2.2. Supraconductibilitatea 309
6.3.2.3. Cazul semiconductorilor 311
6.3.3. Influenţa inducţiei magnetice asupra rezistivităţii . . .312
6.3.4. Variaţia rezistivităţii cu cîmpul electric. 312
6.3.5. Variaţia rezistivităţii sub acţiunea radiaţiilor 313
6.3.6. Variaţia rezistivităţii cu tensiunile mecanice 313
6.3.7. Rezistenţe neohmice. 314
6.4. Energia şi puterea în curent continuu 316
6.5. Efectul Joule 317
6.5.1. Definiţie 317
6.5.2. Legea lui Joule locală. 317
6.5.3. Legea lui Joule integrală 319
6.5.4. Efectul Joule în practică. 321

Scanned with OKEN Scanner

6.5.4.1. Aplicaţii . . . . . .
6.5.4.2. Urmările dăunătoare ale efectului Joule. . . . . .
6.6. Legea lui Ohm generalizată.Generatori. Receptori . . . . .
6.6.1. Cîmp electromotor . . . . . .
6.6.2. Legea lui Ohm generalizată, sub formă locală . . . . . .
6.6.3. Tensiunea electromotoare . . . . . .
6.6.4. Legea lui Ohm generalizată o porţiune de circuit . .
6.6.4.1. Porţiune de circuit constituită dintr-un generator . .
6.6.4.1.1. Rezistenţa interioară a generatorului . . . . . .
666.4.1.2. Energia furnizată de un generator . . . . . .
6.6.4.2. Porţiune de circuit constituită dintr-un receptor . .
6.6.4.3. Legea lui Ohm pentru o porţiune oarecare circuit .
6.6.5. Legea lui Ohm pentru un circuit ansamblu. . . . . .
6.6.5.1. Circuit constituit dintr-un generator şi rezistenţe pasive . . . . . .
6.6.5.2. Circuit liniar conţinînd un generator, un receptor şi rezistenţe pasive . . . . . .
6.6.5.3. Circuit liniar constituit din generatori, receptori şi rezistenţe pasive . . . . . .
6.6.6. Exemple de generatori şi receptori. . . . . .
6.6.6.1. Generatori . . . . . .
6.6.6.2. Receptori . . . . . .
Capitolil VII.- Reţele de conductori . . . . . .
7.1. Definiţii . . . . . .
7.2. Legile lui Kirchhoff . . . . . .
7.2.1. Enunţul legilor . . . . . .
7.2.1.1. Precizări . . . . . .
7.2.1.2. Legea noduriler . . . . . .
7.2.1.3. Legea ochiurilor . . . . . .
7.2.2. Modul de aplicare a legilor lui Kirchhoff . . . . . .
7.2.3. Puntea Weahtstone . . . . . .

7.3. Metoda curenţilor ciclici (de ochiuri) 358
7.4. Metoda potenţialelor de noduri 360
7.5. Suprapunerea regimurilor permanente 364
7.5. Teoremele sursei echivalente 367
7.6.1. Definiţii 367
7.6.2. Teorema sursei echivalente de tensiune 368
7.6.3. Teorema sursei echivalente de curent(Norton) 371
7.7. Teorema reciprocităţii (Maxwell). 373
7.8. Teorema transferului maxim de putere 374
7.9. Rezistenţa echivalentă cu o reţea dipolară pasivă . . . 375
7.9.1. Definiţii 375
7.9.2.Teorema conductanţelor 376
7.9.3. Rezistenţa echivalentă 378
7.9.4. Transformarea triunghi - stea 379
7.9.5. Transformarea stea-triunghi 380
7.10. Aplicaţii ale legilor lui Ohm şi Kirchhoff. 382
7.10.1. Sunt şi rezistenţă adiţională 382
7.10.1.1. Suntul 382
7.10.2. Gruparea generatorilor 384
7.10.2.1. Gruparea în serie 384
7.10.2.2.Gruparea în paralel 385
7.10.2.3. Gruparea mixtă 386
7.10.3.Măsurarea tensiunilor electromotoare şi a diferenţelor de potenţial 387
7.10.3.1. Divizorul de tensiune 387
7.10.3.2. Măsurarea unei tensiuni electromotoare şi a unei diferenţe de potenţial cu un voltmetru. 388
7.10.3.3. Măsurarea unei t.e.m. sau a unei diferenţe de potenţial prin metoda opoziţiei 390
7.10.3.3.1. Metoda opoziţiei de măsurare a t.e.m. 390
a. Varianta cu reocord (cu fir). 390

Relaţii şi modul de lucru 390
Sensibilitatea instalaţiei 392
7.1o.3.3.2. Măsurarea unei diferenţe de potenţial prin metoda opoziţiei 397
7.1o.4. Măsurarea rezistenţelor 398
7.1o.4.1. Metoda ampermetrului şi voltmetrului 398
7.1o.4.1.1. Montajul aval(în derivaţie scurtă) 399
7.1o.4.1.2. Montajul amonte (în derivaţie lungă) 400
7.1o.4.2. Metoda punţii Wheatstone 402
7.1o.4.2.1. Teoria sumară a punţii 402
7.1o.4.2.2. Puntea cu fir. 404
7.1o.4.2.3. Puntea cu cutii de rezistenţe. 407
Capitolul VIII. Electroliza 410
8.1. Curentul electric prin lichide. Electroliţii 410
8.2. Mecanismul conducţiei ionice în electroliţi. 412
8.2.1. Introducere 412
8.2.2. Electroliza fără reacţii secundare 413
8.2.3. Electroliza cu reacţii secundare 415
8.2.4. Electrolizorul cu anod solubil 417
8.2.5. Polarizarea electrolizilor 418
8.3. Legile electrolizei (Faraday 1833) 421
8.3.2. Legi calitative
8.3.2. Legi cantitative 421
8.3.3. Sarcina elementară 423
8.4. Aplicaţiile electrolizei 425
8.5. Legea lui Ohm în cazul electroliţilor 427
8.5.1. Definiţii şi formule 427
8.5.2. Determinarea conductivităţii 431
8.6. Unele date privind soluţiile de electrolit. 433
Capitolul IX.Cîteva tipuri de generatori electrici 436
9.1. Lanţuri heterogene de conductori metalici 436

Scanned with OKEN Scanner

9.1.1. Diferența de potențial de contact 436
9.1.1.1. Lucrul de ieșire 436
9.1.1.2. Efectul Volta. 44o
9.1.2. Efecte termoelectrice. 445
9.1.2.1. Efectul Peltier 446
9.1.2.2. Efectul Thomson 45o
9.1.2.3. Efectul Seebeck 454
9.2. Generatori electrochimici 468
9.2.1. Elemente galvanice 469
9.2.1.1. Pila Volta (1795). 469
9.2.1.2. Pila Daniell. 473
9.2.1.3. Pila Leclanche. 475
9.2.1.4. Pila Weston 476
9.2.1.5. Pile de concentrație 477
9.2.2. Pile de combustie 478
9.2.3. Acumulatori 48o
9.2.3.1. Acumulatori cu plumb 48o
9.2.3.2. Acumulatorii fier-nichel. 485
9.2.3.3. Acumulatori cu argint. 487